

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektrotechniky

# **Návrh a realizace výkonového elektronkového zesilovače.**

Design and Implementation of Vacuum  
Tube Power Amplifier

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU

V Ostravě dne

.....  
podpis studenta

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem stereofonního elektronkového audio zesilovače realizovaného jako dvojčinný v B třídě s koncovými elektronkami EL34. Nejdříve je popsána funkce a možnost realizace jednotlivých bloků. Následně vybráno to nejvhodnější řešení a navržena celková koncepce. S pomocí programů MicroCap9 pro návrh schématu, EAGLE pro realizaci plošných spojů a Autodesk Inventor k návrhu šasi. Celá konstrukce je řešena s ohledem na co největší kvalitu a šířku přenosu. Jsou zde popsány rozdíly mezi zesilovači z elektronek, tranzistorů a integrovaných obvodů z hlediska jejich konstrukce a využití. Součástí práce je také měření charakteristik a chování vytvořeného zesilovače. Veškeré dokumentace k výrobě jsou součástí přílohy.

*Klíčová slova:*

*(elektronkový zesilovač, audio zesilovač, elektronky, tranzistorový zesilovač, integrovaný zesilovač)*

## ABSTRACT

This thesis deals with design of vacuum tube audio amplifier implemented as a push-pull in the class B with end-EL34 tubes. At the first, it describes the function and the feasibility of individual blocks. Subsequently, selected the best solution and designed the overall concept. With programs MicroCap9 for design scheme, Eagle for realization of printed conductors and Autodesk Inventor for design chassis. The entire structure is designed with a view to maximize the quality and bandwidth usage. There are reported differences between the vacuum tubes amplifiers, transistors and integrated circuits in terms of their construction and use. At the end it was measured characteristics and behavior this amplifier. All documentation for the production are included in attachment.

*Keywords:*

*(vacuum tube amplifier, audio amplifier, vacuum tube, transistor amplifier, integrated amplifier)*

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>7</b>
<b>1 ROZBOR ZÁKLADNÍCH ZPŮSOBŮ ZAPOJENÍ VÝKONOVÝCH ELEKTRONKOVÝCH ZESILOVAČŮ. ....</b>	<b>8</b>
1.1 Princip elektronky .....	8
1.2 Výkonový zesilovač .....	13
1.2.1 Vstupní část.....	13
1.2.2 Fázový invertor .....	15
1.2.2.1 Inverze pomocnou elektronkou.....	15
1.2.2.2 Invertor s automatickou symetrizací .....	16
1.2.2.3 Invertor s rozdělenou zátěží .....	17
1.2.2.4 Invertor s proudovou vazbou .....	19
1.2.2.5 Invertor s křížovou vazbou.....	21
1.2.3 Koncový stupeň .....	22
1.2.3.1 Jednočinný koncový stupeň .....	22
1.2.3.2 Dvojčinný koncový stupeň.....	24
1.2.3.3 Třídy zesilovačů .....	25
1.2.3.3.1 Třída A.....	25
1.2.3.3.2 Třída B.....	26
1.2.3.3.3 Třída AB .....	27
1.2.4 Výstupní transformátor .....	28
1.2.5 Zpětná vazba .....	28
<b>2 ROZDÍLY MEZI ZESILOVAČI.....</b>	<b>29</b>
2.1 Elektronky .....	29
2.2 Tranzistory .....	30
2.3 Integrované obvody.....	30
<b>3 NÁVRH A REALIZACE DVOJČINNÉHO VÝKONOVÉHO ZESILOVAČ....</b>	<b>32</b>
3.1 Návrh schématu.....	32
3.1.1 Zesilovač .....	32
3.1.2 Zdroj.....	36
3.2 Návrh desek plošných spojů.....	41
3.3 Návrh šasi.....	44

<b>4</b>	<b>MĚŘENÍ TECHNICKÝCH PARAMETRŮ .....</b>	<b>46</b>
4.1	Výstupní výkon .....	46
4.2	Chování v limitaci .....	47
4.3	Odstup signálu a šumu .....	48
4.4	Frekvenční charakteristika .....	48
4.5	Rychlost přeběhu a stabilita .....	49
4.6	Přechodové zkreslení .....	50
4.7	Harmonické zkreslení.....	50
4.8	Přeslechy mezi kanály.....	51
4.9	Účinnost .....	52
4.10	Porovnání s jinými zesilovači .....	53
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>59</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>61</b>

# ÚVOD

Během posledních několika let zažívají elektronky stále větší návrat do oblasti audiotechniky a to hlavně do nejvyšší Hi-fi kategorie pro svůj zvuk a jistou dávku nostalgie. Cílem této práce je popsat funkci elektronek a zásady návrhu elektronkových zesilovačů pro audio oblast.

V první kapitole je zmíněna historie, vývoj a popsán princip elektronek. Dále jsou popsány základní díly výkonového zesilovače s jejich vlastnostmi, funkcí a možnostmi návrhu.

Druhá kapitola je věnována rozdílům mezi elektronkovými, tranzistorovými a integrovanými zesilovači s ohledem na jejich vývoj, konstrukci, možnosti a oblast použití

Další kapitola se věnuje kompletnímu návrhu celého elektronkového výkonového zesilovače s využitím dnes dostupných komponentů. K ověření návrhu je použito počítačové simulace celého zesilovače včetně jednotlivých napájecích zdrojů. Návrh plošných spojů a šasi. V poslední kapitole jsou popsány výsledné parametry vyrobeného zesilovače včetně metod měření a výsledných grafů a průběhů.

# **1 ROZBOR ZÁKLADNÍCH ZPŮSOBŮ ZAPOJENÍ VÝKONOVÝCH ELEKTRONKOVÝCH ZESILOVAČŮ.**

Nejdříve něco málo o historii a současném použití elektronek v elektronice, hlavně tedy v audio technice. Elektronky byly nejvíce používány v první polovině 20. století. Od 60-tých let byly postupně vytlačovány tranzistory a později i integrovanými obvody z důvodu minimalizace nejen rozměrové, ale i finanční. V současné době se stále používají v některých specifických zařízeních. Svým způsobem nejznámější a nejdéle používanou elektronkou je vakuová obrazovka. Elektronky jako zesilovací prvek se do audiotechniky vracejí pro svůj nenapodobitelný zvukový projev a jistou dávku nostalgie. Dnes je najdeme často v High-End zařízeních těch nejvyšších cenových skupin. Někdy bohužel jako pokus o navýšení ceny bez znatelného přínosu.

## **1.1 Princip elektronky**

Na obr. 1 je znázorněn principiální náčrt konstrukce elektronky konkrétně triody. Ve skleněné baňce, z níž je vyčerpán vzduch, jsou soustředně umístěny jednotlivé části triody:

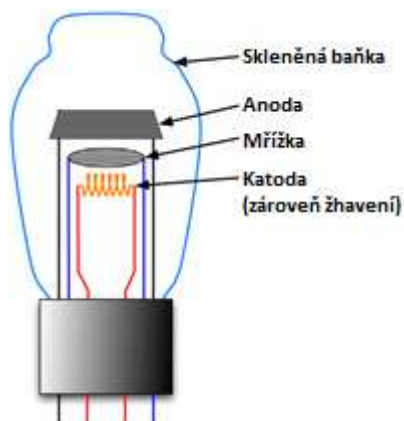
Přímo žhavená katoda (obvykle nepřímo žhavená žhavicím vláknem)

Drátěná mřížka

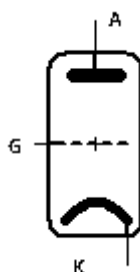
Vnější kovová anoda

Všechny elektrody jsou vyvedeny přes koliky patice. Schematická značka triody je uvedena na obr. 2. Její názornost je zcela jistě zřejmá, takže není třeba ji podrobněji vysvětlovat. Připomenutí jen, že vývod anody se označuje písmenem A, vývod katody písmenem K, vývod mřížky písmenem G (z angl. grid) a vývody žhavicího vlákna písmeny f (z anglického výrazu filament- žhavicí vlákno).



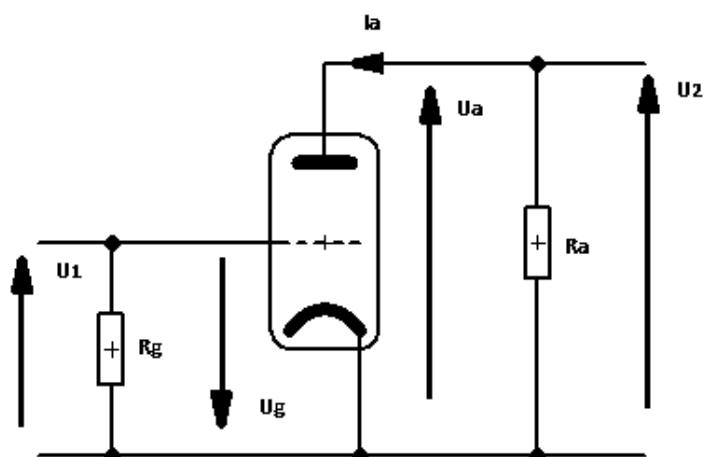


*Obr. 1 Znáznornění konstrukce elektronky (triody)*



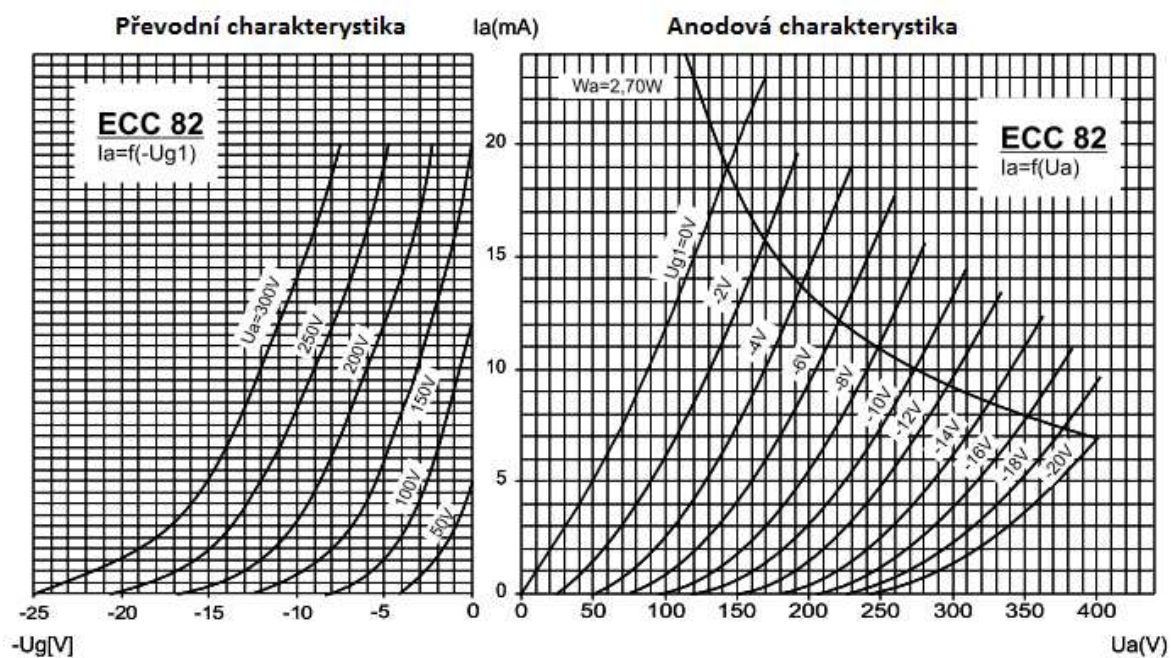
*Obr. 2 Schématická značka elektronky (triody)*

Na obr. 3 je znázorněno základní zapojení triody v elektrickém obvodu. Pracovní bod triody je určen anodovým napětím  $U_a$ , anodovým proudem  $I_a$  a mřížkovým napětím  $U_g$  (mřížka je vzhledem ke katodě záporná, mřížkový proud je nulový). S rostoucím vstupním napětím  $U_1$  na mřížkovém odporu  $R_g$  se zvětšuje anodový proud  $I_a$ , zmenšuje se anodové napětí  $U_a$  a zvětšuje výstupní napětí  $U_2$  na odporu  $R_a$ .



Obr. 3 Základní zapojení triody

Napět'ové zesílení elektronky je tedy dáno vztahem:  $A_v = \frac{U_2}{U_1}$



obr. 4 Modelová charakteristika elektronky triody ECC82

Vlastnosti elektronky se popisují statickými charakteristikami. Na obr. 4 je znázorněna modelová charakteristika elektronky (triody ECC82). V levé části je znázorněna převodní charakteristika (angl. transfer characteristic), tedy parametrická závislost anodového proudu  $I_a$  na mřížkovém napětí  $U_g$  pro různá anodová napětí  $U_a$ . V pravé části je anodová charakteristika (angl. plate characteristic), tedy parametrická závislost anodového proudu  $I_a$  na anodovém napětí  $U_a$  pro různá mřížková napětí  $U_g$ .

Dynamické vlastnosti elektronky pro malé změny signálu popisují diferenciální parametry pro daný pracovní bod:

Strmost  $S$  (angl. slope, mutual conductance, transconductance) je poměr přírůstku anodového proudu  $\Delta I_a$  k přírůstku mřížkového napětí  $\Delta U_g$  při konstantním anodovém napětí  $U_a$  a udává se obvykle v [mA/V]:

$$S \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \text{ při } U_a = \text{konst.}$$

Vnitřní odpor  $R_i$  (angl. plate impedance) je poměr přírůstku anodového proudu  $\Delta I_a$  k přírůstku anodového napětí  $\Delta U_a$  při konstantním mřížkovém napětí  $U_g$  a udává se obvykle v [kΩ]:

$$R_i \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \text{ při } U_g = \text{konst.}$$

Zesilovací činitel  $\mu$  (angl. amplification factor) je poměr přírůstku anodového napětí  $\Delta U_a$  k přírůstku mřížkového napětí  $\Delta U_g$  při konstantním anodovém proudu  $I_a$ :

$$\mu \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} \text{ při } I_a = \text{konst.}$$

Al/g

Průnik  $D$  (angl. penetrance) je převrácenou hodnotou zesilovacího činitele:

$$D \frac{1}{\mu}$$

Mezi diferenciálními parametry elektronky v daném pracovním bodě platí tzv. Barkhausenův vztah:

$$S \cdot R_i \cdot D = 1$$

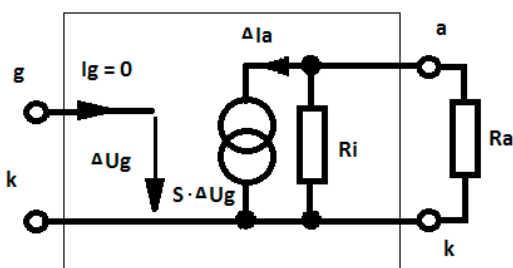
Pracovní bod  $P$  je jednoznačně určen trojicí odpovídajících hodnot  $U_a$ ,  $I_a$  a  $U_g$  (obvykle se tyto hodnoty zjistí z katalogu pro konkrétní elektronku). Pro tento pracovní bod je definován anodový odpor v pracovním bodě vztahem:

$$R_p = \frac{U_a}{I_a} \text{ při } U_g = \text{konst.}$$

Na obr. 4 jsou znázorněny náhradní zapojení elektronky pro malé změny signálu v okolí pracovního bodu  $P$ . Vstupní odpor  $R_g$  lze v tomto případě považovat za nekonečně velký, takže vstupní proud  $I_g = 0$ . Na obr. 4a je náhradní zapojení se zdrojem proudu  $\Delta I_a$  řízeného napětím  $\Delta U_g$ , z výše uvedeného vztahu plyne  $\Delta I_a = S \cdot \Delta U_g$  (kde  $S$  je strmost). Vnitřní odpor elektronky  $R_i$  je zapojen paralelně k řízenému zdroji proudu. Na obr. 4b je náhradní zapojení se zdrojem napětí  $\Delta U_a$  řízeným napětím  $\Delta U_g$ , z výše uvedeného vztahu plyne  $\Delta U_a = \mu \cdot \Delta U_g$  (kde  $\mu$  je zesilovací činitel). Vnitřní odpor  $R_i$  je v tomto případě zapojen v sérii s řízeným zdrojem napětí.

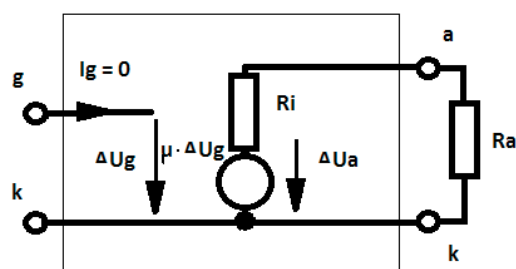
Zatěžovací odpor  $R_a$  se v náhradním zapojení připojuje mezi svorky **a** a **k** tak že odpory  $R_a$  a  $R_i$  potom tvoří dělič napětí. Pro zesílení  $A_u$  lze potom odvodit vztah

$$A_u = \mu \cdot \frac{R_a}{R_i + R_a}$$



Obr. 4a

Náhradní schéma s řízeným zdrojem proudu

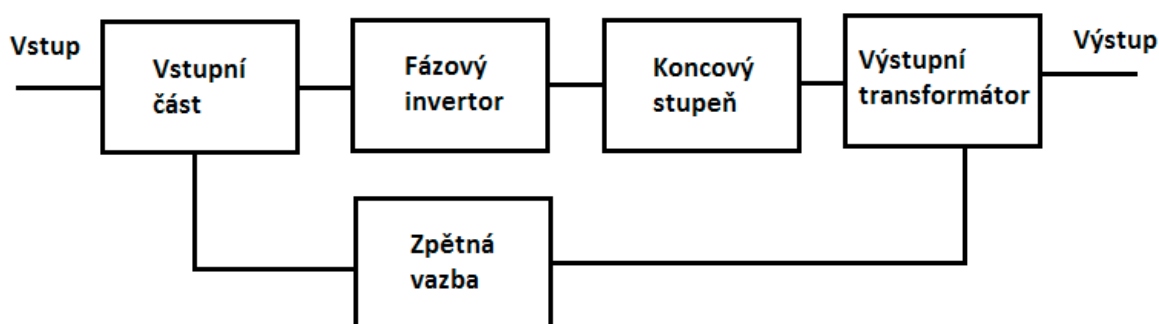


Obr. 4b

Náhradní schéma s řízeným zdrojem napětí

## 1.2 Výkonový zesilovač

Konstrukcí výkonového zesilovače je několik. Odvíjejí se od požadavků na vlastnosti. Pro svou účinnost a tedy možnost použití na běžných vícepásmových reproduktorech s účinností kolem 88dB se nejčastěji používá dvojčinného zapojení se zpětnou vazbou viz obr. 5. Například pro reproduktory s ozvučnicí Hornové konstrukce s citlivostí nad 95dB se nejvíce používá konstrukce jednočinného zesilovače bez zpětné vazby.



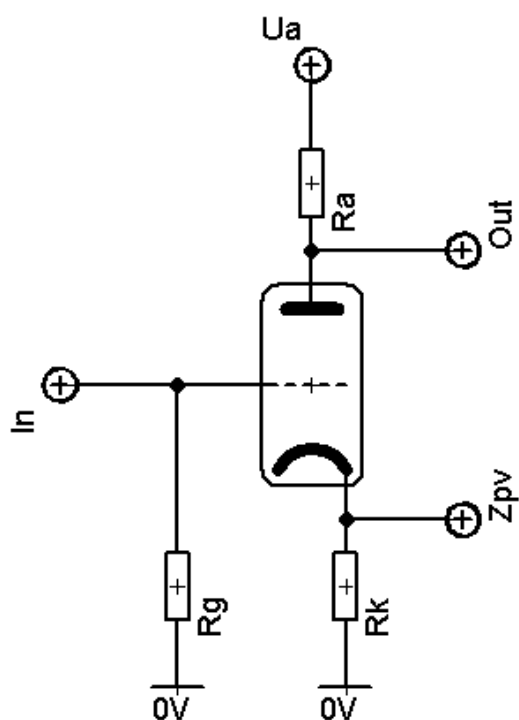
Obr. 5 Blokové schéma zesilovače

### 1.2.1 Vstupní část

Vstupní elektronka je obvyklý odporově vázaný zesilovací stupeň obr. 6, který má na katodový odpor  $R_k$  nebo jen na jeho část zavedenu zápornou zpětnou vazbu z výstupu zesilovače. Katodový odpor, popř. jeho část nepřemostěná kondenzátorem, sloužící k zavedení celkové zpětné vazby z výstupu, působí zároveň místní zápornou proudovou vazbu.

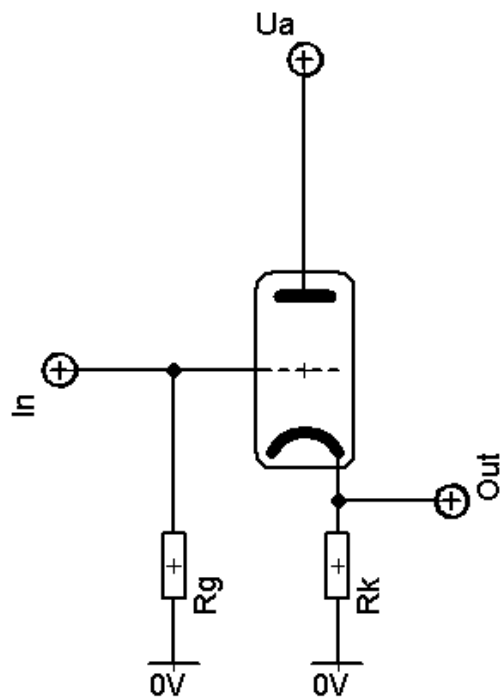
Vstupní elektronka může být buď trioda, nebo pentoda. Hlavní výhoda, kterou pentody v jiných případech poskytují, totiž malá vstupní kapacita, se v tomto případě neuplatní, protože zesílení vstupní elektronky je působením zpětné vazby jen velmi malé. Tím je malý i Millerův jev, a tedy i vstupní kapacita. Proto může mít řídicí zesilovač poměrně velký výstupní odpor.

Pentody se na vstupu používá jen tehdy, má-li zesilovač nedostatek zisku, např. když za vstupní elektronkou následuje invertor s rozdělenou zátěží a pak hned koncový stupeň.



obr. 6 Zapojení vstupní elektronky

V některých případech se použije takzvaného katodového sledovače viz obr 7. Zapojení elektronky jako sledovače napětí se zesílením  $A_u = 1$



Obr. 7 Elektronka jako katodový sledovač

## 1.2.2 Fázový invertor

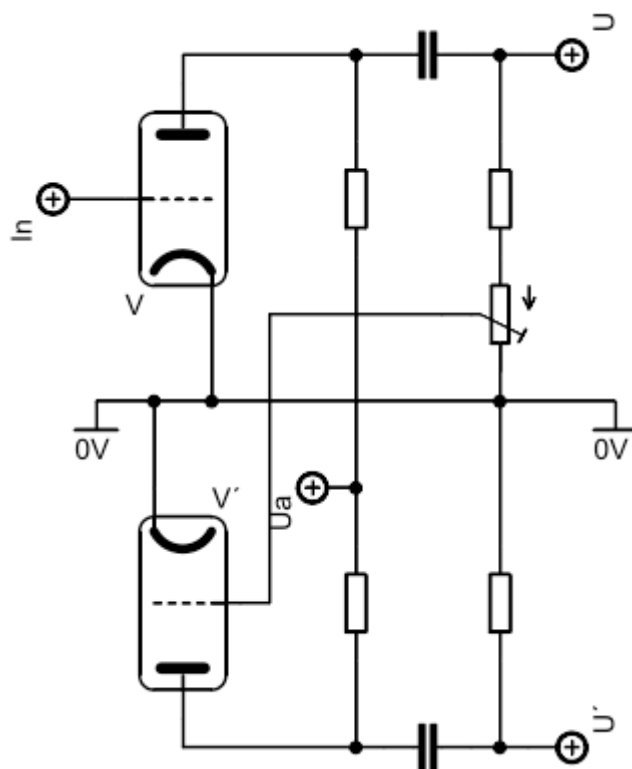
K buzení koncového dvojčinného stupně je zapotřebí dvou signálních napětí stejné velikosti, ale opačné polarity. Protože zdroje signálu jsou obvykle jednočinné, tedy poskytují jen jedno napětí nesouměrné proti zemi, je nutný mezistupeň, který by přeměnil signální napětí na souměrné, nebo který by druhou složku signálu opačné polarity vytvořil. Tomuto stupni se říká fázový invertor (obraceč fáze) a klade se na něj řada požadavků.

Souměrnost obou výstupních napětí invertoru musí být nezávislá na velikosti signálu a na jeho kmitočtu a má být zachována i při případném přebuzení zesilovače. Nemá se porušit stárnutím či výměnou elektronky ani jiných součástí invertoru a k jejímu nastavení nemá být zapotřebí měřicích přístrojů. Přitom invertor má pokud možno zesilovat a dodávat bez velkého zkreslení výstupní napětí několik desítek voltů tak, aby mohl vybudit i koncový stupeň opatřený místní zápornou vazbou.

Nejjednodušším takovým invertorem by byl zesilovací stupeň s nf transformátorem, jehož sekundární vinutí je rozděleno na dvě poloviny. Obtíž je však v tom, že na nf transformátor se kladou značné nároky. Musí přenášet celé kmitočtové pásmo, nemá působit tvarové zkreslení, nemá být citlivý na okolní rozptylová pole a protože pracuje ve stupni, který je zpravidla zahrnut ve smyčce zpětné vazby, nemá působit znatelné fázové zkreslení v kmitočtovém rozsahu ještě značně širším, než je jeho pracovní rozsah. Tyto požadavky lze sice při použití permalloyového jádra zcela uspokojivě splnit, ale transformátor by byl rozhodně dražší, složitější a rozměrnější než elektronka nebo přídatný elektronkový systém dvojité triody. Proto se všeobecně dává přednost invertoru elektronkovému před transformátorovým.

### 1.2.2.1 Inverze pomocnou elektronkou

První invertor obr. 8 používá přídatné elektronky  $V'$  která byla buzena na mřížce malou částí výstupního napětí  $U_2$  hlavní elektronky  $V$ , nastavenou potenciometrem  $q$  tak, aby po průchodu zesilující elektronkou  $V'$  byla velikost výstupního napětí ( $U_2$ ) stejné, avšak opačné polarity než výstupní napětí hlavní elektronky  $V$ .



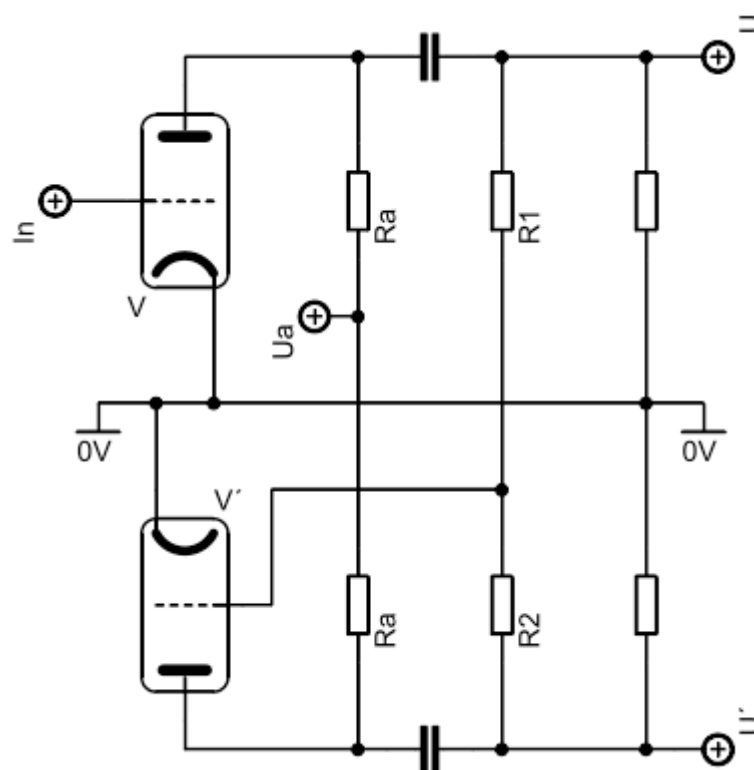
Obr. 8 Invertor s pomocnou elektronkou

Souměrnost obou napětí záviselá na správném nastavení potenciometru, které je nutno kontrolovat měřením obou napětí a stárnutím nebo výměnou elektronky V' se poruší. Také kmitočtový rozsah obou napětí nebyl zcela stejný, protože v zesilovací cestě napětí  $U_2'$  je zařazen jeden člunek RC navíc proti cestě napětí  $U_2$ .

### 1.2.2.2 Invertor s automatickou symetrizací

Nutnost nařizování potenciometru a závislost na vlastnostech elektronky lze odstranit jednoduchou úpravou zapojení podle obr. 9. Toto zapojení se liší od obr. 8 tím, že k získání budicího napětí pro elektronku V' používá přídavného děliče  $R_1$   $R_2$ , jehož uzel je připojen k mřížce V'. Tato okolnost umožní, že budicí napětí je ovlivňováno nejen napětím  $U_2$ , ale zpětně také napětím U čímž je dosaženo automatického nastavení souměrnosti.



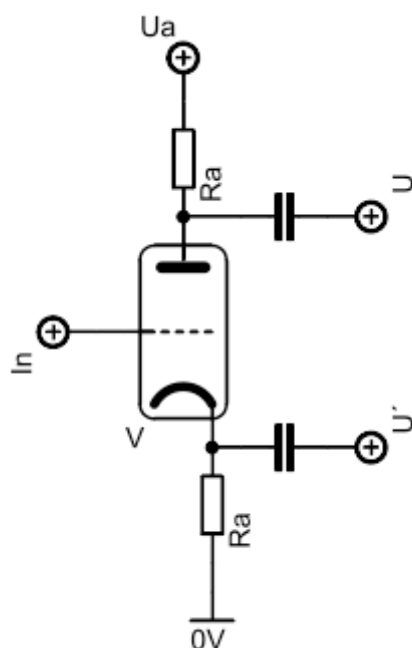


*Obr. 9 invertor s automatickou symetrizací*

Invertor není citlivý k nepřesnému nastavení odbočky i ke změnám zesílení způsobeným elektronkou nebo vazebním odporem, stačí tedy vybrat pro dělič dva odpory buď stejné, nebo horní z nich o 3 až 4 % menší než dolní.

### 1.2.2.3 Invertor s rozdělenou zátěží

Dalším často užívaným zapojením je invertor s rozdělenou zátěží, tj. s vazebním odporem rozděleným na dva stejné díly  $R_a/2$  zapojené v katodovém a anodovém přívodu elektronky obr. 10. Vlastnosti tohoto invertoru lze snadno posoudit i bez výpočtu. Oběma vazebními odpory prochází týž proud, takže k dosažení stejných napětí stačí, aby oba odpory byly stejně velké, zatím co vlastnosti nebo výměna elektronky nemá na souměrnost vliv.



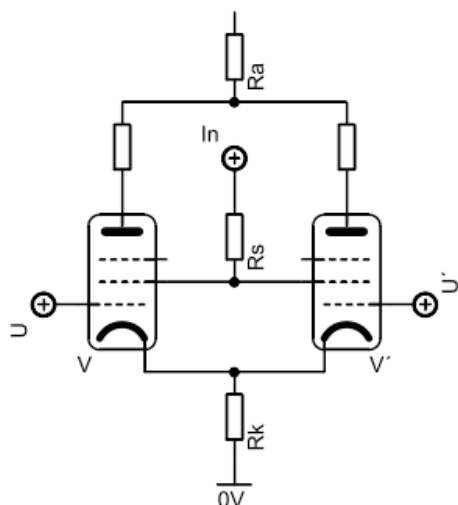
*Obr. 10 Invertor s rozdělenou zátěží*

Při použití elektronky s velkým zesilovacím činitelem přibližně platí že zesílení  $A_u = 2$ , což ostatně vyplývá i z toho, že elektronka pracuje, na katodové straně, jako katodový sledovač, který by sám měl přibližně jednotkové zesílení, ale vlivem přídavné zátěže v anodovém obvodu dává výstupní napětí dvojnásobné.

Invertor s rozdělenou zátěží má proti předcházejícímu některé nevýhody, např. vyžaduje dva stejné vazební odpory. Mimoto při případném přebuzení následujícího zesilovacího stupně do oblasti mřížkového proudu odříznou se tímto mřížkovým proudem špičky signálního napětí  $U'$  na katodě elektronky invertoru, takže se zvětší její buzení, a tím dostane signální napětí  $U$  na anodovém odporu zvětšené špičky. Další nevýhodou je to, že celkové signální napětí, které může invertor dodat, se dělí na oba výstupy, takže je menší než u předcházejících zapojení, v nichž každá z elektronek pracovala do svého vlastního výstupu. Na druhé straně však záporná vazba na katodovém odporu zmenšuje zkreslení a tím dovoluje větší vybudování elektronky, takže omezení výstupního napětí není příliš citelné. Uvedené nevýhody vyvažuje částečně to, že katoda invertoru má potenciál několika desítek voltů, což dovoluje přímou vazbu.

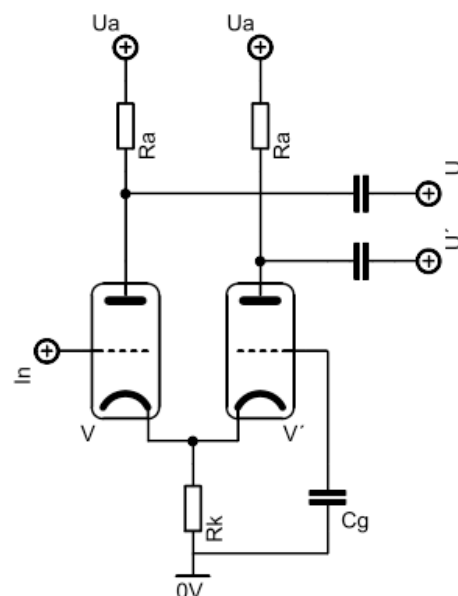
#### 1.2.2.4 Invertor s proudovou vazbou

Další zapojení invertoru je možno zahrnout pod souhrnný název invertorů s proudovou vazbou společným odporem zařazeným buď v obvodu katody, nebo anody či ve stínících mřížkách u několikamřížkových elektronek obr. 11. Činnost těchto invertorů objasní tato úvaha: Dvě stejné elektrony, které mají buď v katodovém, nebo v anodovém přívodu, popř. v přívodu stínících mřížek nebo v několika z těchto přívodů zároveň, zařazen společný odpor. Budíme-li obě elektrony napětími  $U$  a  $U'$  stejného kmitočtu, pak při stejné velikosti, ale opačné polaritě obou napětí jsou také proudy jednotlivých elektrod u obou elektronek stejné a opačného směru, takže se ve společných odporech vyruší, a proto na odporech nevzniká vazba pro signál. Je-li však jedno z budicích napětí, např.  $U$  menší, je také anodový a popř. stínicí proud elektrony  $V'$  menší. Ve společných odporech proto převažuje složka proudu elektrony  $V$  a vzniká na nich složka signálního napětí, která silněji buzenou elektronku v příslušné elektrodě odbuzuje a slaběji buzenou přibuzuje, takže se nesouměrnost výstupních proudů zmenší. V krajním případě nesouměrného buzení, tj. když mřížka elektrony  $V'$  je uzemněna, takže  $U_1' = 0$ , vznikne invertor vázaný společným odporem v obvodu katody nebo anody či stínicí mřížky. Účinnost symetrizace společným odporem závisí ovšem na tom, ve které elektrodě je odpor zapojen a je dostatečná jen u invertoru se společným odporem v katodovém obvodu, tj. u tzv. invertoru s katodovou vazbou.



Obr. 11

*Invertor s proudovou vazbou  
spojenými odpory*



Obr. 12

*Invertor s katodovou vazbou*

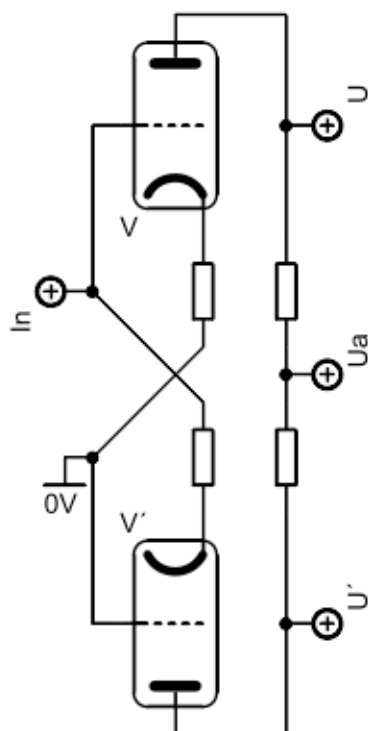
Zesílení nezávisí na velikosti katodového vazebního odporu  $R_k$  a je stejné, jako kdyby šlo o jedinou elektronku s vazebním odporem  $R_a$ .

Souměrnost lze tedy libovolně zlepšit volbou dostatečně velkého odporu  $R_k$ . Nevýhodou však je, že se tím zmenšuje anodové napětí elektronek a tím zmenšuje výstupní napětí, které mohou dodat; proto je účelné spokojit se s horší souměrností a vyrovnat ji popř. volbou poněkud odlišných anodových odporů. Na druhé straně však okolnost, že katody mají vyšší potenciál, umožňuje použít přímé vazby.

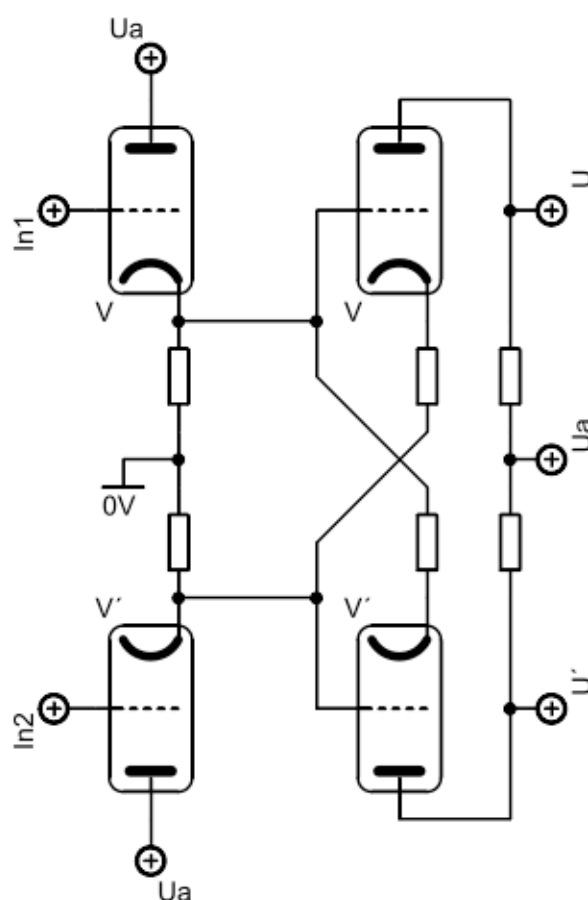
U vazby společným odporem v obvodech stínících mřížek a zejména u vazby společným odporem v anodovém obvodu je symetrizace mnohem horší, a proto těchto zapojení nelze vůbec použít k fázové inverzi. Lze však snadno zlepšit jejich činnost tím, že se signální napětí z vazebního odporu přivede na řídicí mřížku druhé elektronky invertoru.

### 1.2.2.5 Invertor s křížovou vazbou

Na obr. 13 je další typ invertoru s tzv. křížovou vazbou. Vstupním napětím  $U_I$  je buzena do mřížky elektronka  $V$  a současně do katody elektronka  $V'$ , takže její buzení je proti  $V$  přepólováno. Proto výstupní napětí obou elektronek mají opačnou fázi. Kdyby mělo být zapojení zcela souměrné, musel by být také zdroj  $U_I$  souměrný proti zemi. Protože však je jeden jeho pól spojen se zemí, pracuje elektronka  $V$  s uzemněnou katodou a elektronka  $V'$  s uzemněnou mřížkou, takže zapojení není zcela souměrné a je nutná dodatečná symetrizace tím, že jeden z katodových odporů je regulovatelný. Protože elektronka  $V'$  je buzena do katody, musí mít zdroj malý vnitřní odpor, takže je nutno zapojit předcházející elektronku jako katodový sledovač a invertor potřebuje tedy nejméně tři elektronkové systémy. Tím by však zůstala nevyužita druhá polovina jedné dvojité triody, a proto se častěji používá zapojení podle obr. 14, v němž spodní elektronka může sloužit buď pro přímíšení dalšího signálu, nebo k zavedení záporné vazby, či jen jako symetrizační odpor.



Obr. 15 Invertor s křížovou vazbou



Obr. 16 Invertor s křížovou vazbou a přídanou elektronkou

Jak patrně, potřebují invertory s křížovou vazbou nejméně o jeden elektronkový systém více, a jsou proto celkem méně výhodné než některá předcházející zapojení.

Porovnáním vlastností jednotlivých invertorů dojdeme k závěru, že patrně lze vyřadit invertor s pomocnou elektronkou, podle obr. 8 a invertory s vazbou společným odporem v obvodech anod nebo stínících mřížek. Invertor s křížovou vazbou je nevýhodný, neboť potřebuje další elektronku, takže zbývá volba mezi invertorem s rozdělenou zátěží, s automatickou symetrizací a s katodovou vazbou. Vyřadíme-li ještě dále invertor s rozdělenou zátěží, vzhledem k menšímu výstupnímu napětí, zbývají jen poslední dva typy, mezi nimiž je skutečně těžko volit.

Předností invertorů s automatickou symetrizací je dvojnásobně větší zesílení a okolnost, že jeho elektronky mají napájecí napětí nezmenšené katodovým odporem. Předností invertorů s katodovou vazbou je menší zkreslení díky záporné vazbě katodovým odporem, jež potlačuje zkreslení sudými harmonickými a dále to, že v obou polovinách výstupu je stejný počet článků  $RC$ .

### **1.2.3 Koncový stupeň**

Koncový stupeň může být buď jednočinný, nebo dvojčinný a osazen buď triodami, nebo pentodami. Dříve se považovaly triody za vhodnější pro jakostní reprodukci, tvrdilo se, že mají menší zkreslení a výhodnější vlastnosti než pentody. Po té se však rozšířilo používání zpětné vazby v koncovém stupni, což dovoluje upravit vlastnosti koncových pentod, jde o zkreslení a vnitřní odpor, tak že předčí triody a přitom zachovávají účinnost a výstupní výkon odpovídající pentodě.

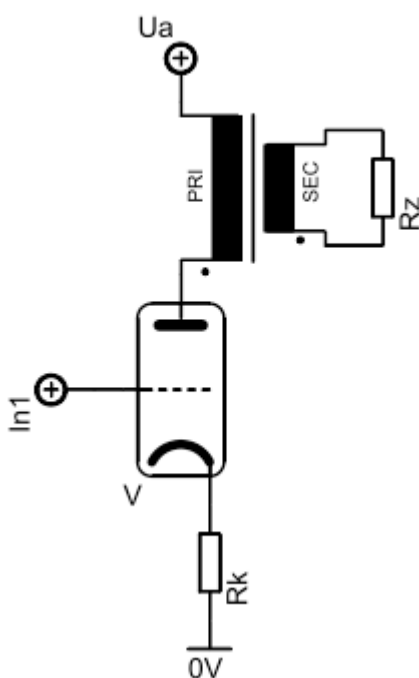
#### **1.2.3.1 Jednočinný koncový stupeň**

Zesilovače s jednočinným stupněm (angl. *single-ended* = SE), tedy s jednou koncovou elektronkou, patří k těm konstrukčně nejjednodušším. Nevýhodou je poměrně malý výkon, kterého lze dosáhnout. Většinou se tyto zesilovače používají jako jednoduché koncové stupně s malými nebo středními výkony pro domácí poslech, případně jako kytarové zesilovače. Výhodou je právě jejich jednoduchost a malý počet prvků zařazený do signálové cesty a tím i minimální deformace respektive zkreslení signálu

Účinnost je vždy menší než 50 %; většinou bývá 35 až 45 % podle toho, jak velké zkreslení připustíme.

Ani při mírném buzení a správné volbě zátěže není však průběh zcela nezkreslený, protože kladná půlvlna proudu se vždy poněkud liší od záporné. Proto smí být jednočinný stupeň jen poměrně málo vybuzen, takže má malou účinnost. Další nevýhodou je to, že výstupní transformátor je magnetizován stejnosměrnou složkou anodového proudu, takže nemá-li být jádro přesyceno, musí mít vzduchovou mezeru.

Jako koncové elektronky se dnes nejčastěji používají legendární triody 300B. První tuto elektronku vyrobila v USA již v roce 1932 firma Western Electric a vyrábí je dodnes. Nebo původně ruské pentody 6C33C (6S33S) vynikající svou strmostí 30-50mA/V proti 4-6mA/V u 300B



*Obr. 17 Základní zapojení jednočinného koncového stupně*

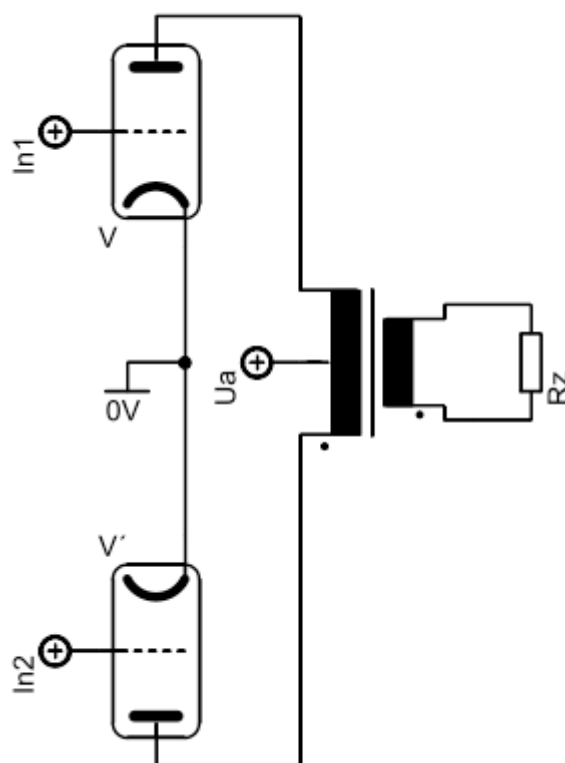
### 1.2.3.2 Dvojčinný koncový stupeň

Ve výkonnějších zesilovačích se využívá výhradně dvojčinných stupňů. Použití jednočinných stupňů by sice bylo možné, avšak vyžadovalo by elektronku s větší anodovou ztrátou, než mají dohromady obě elektronky dvojčinného zesilovače, a dále výstupní transformátor s větším průřezem jádra i lépe filtrovaný napájecí zdroj, takže celý zesilovač by vyšel dražší a těžší než rovnocenný stupeň dvojčinný

Obvyklý dvojčinný stupeň má dvě stejné elektronky, které jsou napájeny ze společného zdroje a na mřížkách buzeny signály navzájem opačné polarity obr. 18. Půl vlna signálu, která je na mřížce elektronky V např. kladná, je současně na mřížce V' záporná, takže u této elektronky zabíhá do části malých anodových proudů. Ve druhé půl vlně je naopak na mřížce V' signál kladný a na mřížce V záporný, takže tentokrát V zabíhá do oblasti malých anodových proudů. Obě půl vlny jsou tedy zesilovány stejně.

Stejného efektu je možné dosáhnout použitím samostatného výstupního transformátoru u každé elektronky a připojit zátěž k sekundárním vinutím spojeným např. do série. To by však bylo neúčelné, protože jednak by byly nutné dva transformátory, jednak by oba byly stejnosměrně syceny jako u jednočinného zesilovače, a proto se vždy používá transformátoru společného. Klidové anodové proudy procházejí oběma primárními vinutími společného transformátoru proti sobě, takže se stejnosměrné magnetizace jádra navzájem ruší.





*Obr. 18 Základní zapojení dvojčinného koncového stupně*

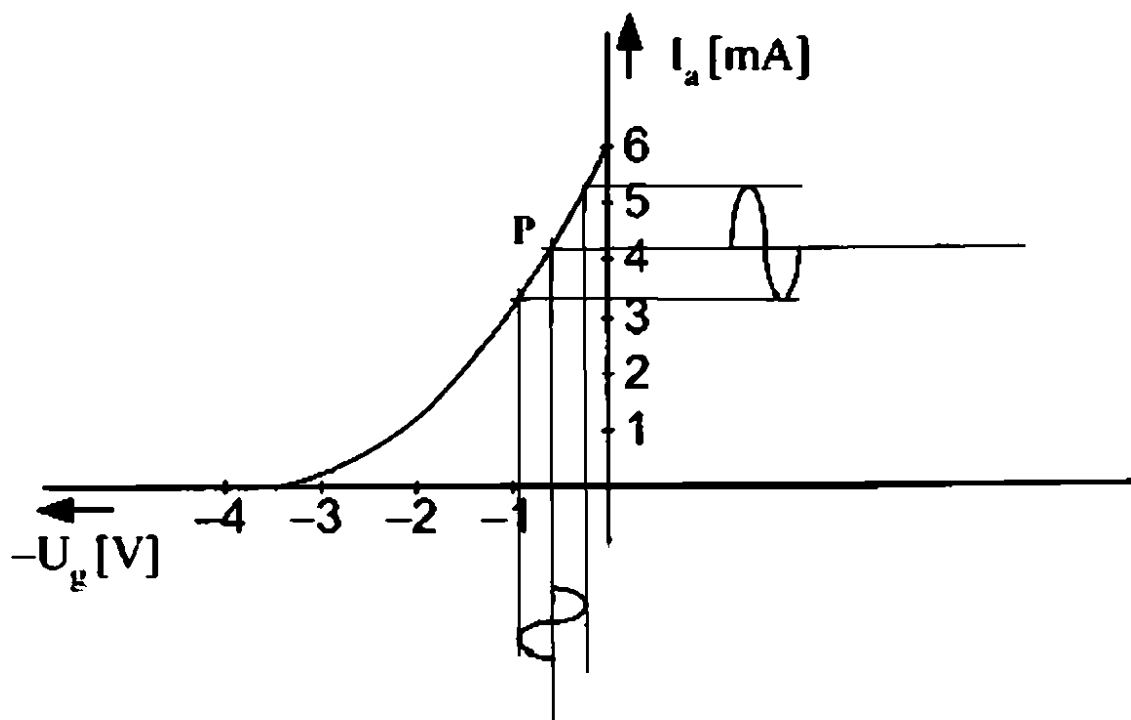
### 1.2.3.3 Třídy zesilovačů

Nastavením velkých klidových proudů elektronek lze dosáhnout, aby stále pracovaly obě elektronky, kdežto naopak, nastaví-li se klidové proudy velmi malé, bude pracovat střídavě vždy jen jedna z obou elektronek a druhá bude zcela uzavřena. Podle toho se rozlišují tzv. třídy zesilovačů na třídu A, třídu B a přechodnou třídu AB

#### 1.2.3.3.1 Třída A

Ve třídě A, která odpovídá velkému klidovému proudu, není žádná z elektronek zcela uzavřena ani při největším přípustném záporném signálu na své mřížce a trvale tedy pracují obě elektronky. Každá z elektronek vlastně pracuje stejně jako v jednočinném stupni; proto je účinnost dosažitelná u pentod 35 až 45 %, zato zkreslení je poměrně malé. Této vlastnosti se dnes využívá zejména v oblasti konstrukce kvalitních Hi-End zesilovačů.

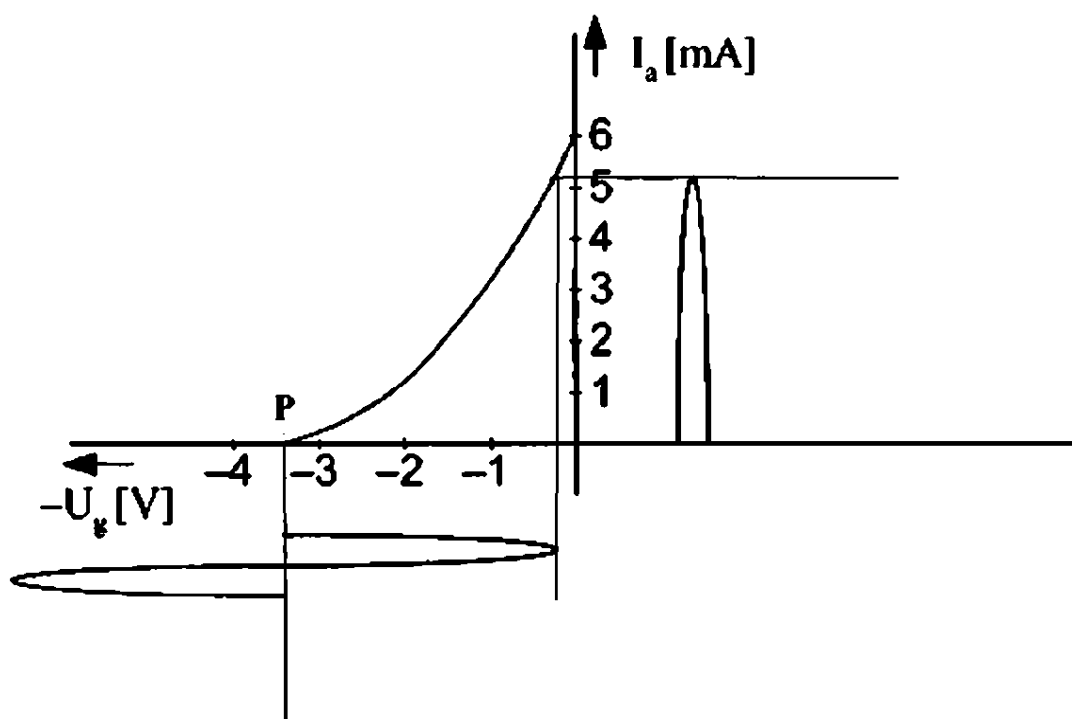
Třídou A1 se označuje zesilovač, u něhož mřížkou neteče proud (mřížkové předpětí je vždy záporné), a třídou A2 zesilovač, u něhož při části periody signálu teče mřížkou proud.



Obr. 19 Přenos pro třídu A

### 1.2.3.3.2 Třída B

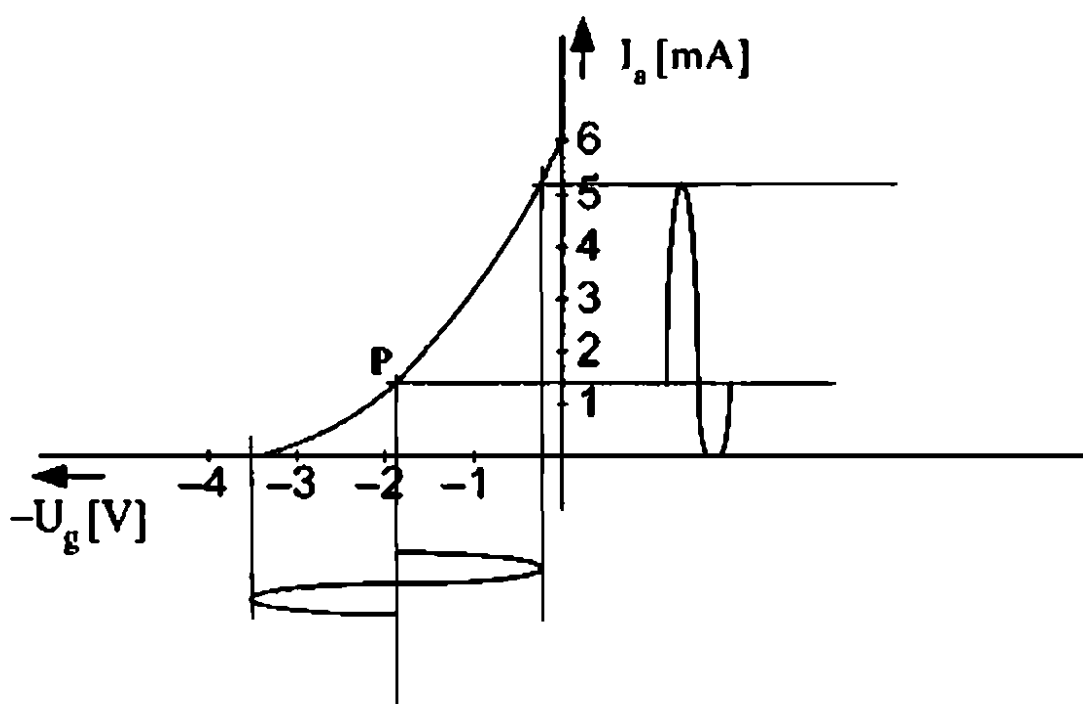
Opačný případ s malými klidovými proudy, při němž pracují obě elektronky střídavě, je zesilovač třídy B. Ve třídě B je účinnost mnohem větší, protože elektronky jsou v klidu téměř nezátíženy a odebírají jen velmi malý proud z napájecího zdroje. Klidové odlehčení elektronek dovoluje použít vyššího anodového napětí, což účinnost ještě dále zvětšuje, teoreticky je u zesilovačů třídy B dosažitelná účinnost 78,5 %, prakticky 45 až 60 %.



Obr. 20 Přenos pro třídu B

### 1.2.3.3 Třída AB

Zesilovač třídy B má při malých signálech, kdy elektronky pracují v ohybu charakteristik, podstatně větší zkreslení než zesilovač třídy A, a proto se u jakostních zesilovačů neuplatní a používá se zesilovacího stupně přechodného typu, třídy AB. Tento stupeň má klidové proudy nastaveny tak, že jsou sice menší, než by odpovídalo třídě A, avšak ne zcela v ohybu charakteristik, jako u třídy B. Takový zesilovací stupeň pracuje při slabším signálu jako v třídě A a teprve při velkém signálu pracuje ve třídě B



Obr. 21 Přenos pro třídu AB

## 1.2.4 Výstupní transformátor

Výstupní transformátor je největší, nejtěžší, patrně i nejpracnější a nejdražší součástí celého zesilovače. Přitom je to součást, která i při pečlivém provedení působí určité zkreslení a zároveň svým fázovým posunem znemožňuje, abychom silnou zápornou vazbou toto zkreslení dostatečně omezili. Proto je také výběr správného výstupního transformátoru tím nejdůležitějším. Jako u každého transformátoru je důležitý přenesený výkon ale také jeho frekvenční rozsah. Velký útlum při vyšších frekvencích může způsobit ztrátu barvy zvuku některých nástrojů, ale příliš velký rozsah může pro změnu způsobit problémy s kmitáním nebo rušením.

## 1.2.5 Zpětná vazba

Každý reálný zesilovač zkresluje, takže na výstupu mimo napětí signálního kmitočtu má ještě napětí vyšších harmonických, které závisí na vybuzení. Také může vstupní napětí obsahovat rušivé napětí vzniklé např. nedostatečným filtrováním napájení, které nezávisí na buzení.

Zpětnou vazbou se zmenší jak zesílení, tak i napětí složek zkreslení a rušivé napětí. Zmenšení zkreslujícího a rušivého napětí zpětnou vazbou je dosaženo tím, že se budicí napětí nazpět

přivedeným napětím opačně zkreslí tak, aby se zkreslující složky po průchodu zesilovačem z největší části vykompenzovaly s původním zkreslením.

Nejčastěji se používá záporné vazby ze sekundárního vinutí výstupního transformátoru na katodu stupně před fázovým invertorem podle vzoru známého Williamsonova zesilovače viz obr. 5.

## **2 ROZDÍLY MEZI ZESILOVAČI**

O problematice rozdílů mezi elektronkami a tranzistory se vedou dlouhé spory od doby vynálezu tranzistoru a jeho masové výroby. Některé do dnes se objevující argumenty přetrvají ještě z éry germaniových tranzistorů, které jsou dnes dávno překonané. Účelem této kapitoly není ani nemůže být jasné resumé které z řešení je lepší, ale poukázat na rozdíly. Konečným měřítkem audiotechniky je totiž lidské ucho a co se někomu líbí, může jiný nenávidět.

Porovnání zesilovačů se dále věnuje i kapitola 4.10 kde jsou uvedeny některé naměřené parametry.

### **2.1 Elektronky**

Ne všechny elektronky znějí stejně. Každá z elektronek má jiné zvukové vlastnosti a dokonce stejné modely se liší podle výrobce. Dobré znění elektronek také úzce souvisí s jejími elektrickými parametry.

Používání elektronek v zesilovačích není jen otázka, zda použít jako aktivní prvek elektronku nebo tranzistor, ale nese s sebou celou filozofii složení aparatury od zdroje audiosignálu po reproduktory. Důraz je kladen hlavně na jednoduchost a účinnost. Ty nejkvalitnější a nejdražší elektronkové aparatury jsou vesměs realizovány jako jednočinné zesilovače v A třídě bez zpětné vazby s výkonem kolem jednotek maximálně desítky wattů, za nimiž následují reproduktory s citlivostí přesahující 95db konstruovány jako širokopásmové měniče bez pasivních filtrů a dalších omezení. Například reproduktory Lowther, Fostex či AER v ozvučnicích Hornové konstrukce. Takováto konstrukce má svá úskalí hlavně v nutnosti použití velice kvalitních, ale zároveň drahých součástek, protože je nutné dodržet co nejvyšší hodnotu odstupu rušivých signálů od užitečného signálu, což není při relativně malém zesílení vůbec jednoduché

Další v podstatě samostatnou kapitolou je použití elektronek v kytarových zesilovačích kde se jejich zkreslení využívá pro dokreslení zvuku nástrojů. Elektronky mají často nestandardně nastavené pracovní body pro dosažení dřívější limitace. Konstrukce takových zesilovačů se od klasického audio zesilovače liší v několika ohledech. Obsahuje několik samostatných zkreslujících smyček s možností přepínání podle momentálního přání muzikanta. Koncový stupeň je s požadavkem na vysoký výstupní výkon řešen většinou jako dvojčinný s více než jedním párem koncových elektronek. Existuje sice několik integrovaných obvodů s podobným chováním jako náhrada, ale jejich výsledný projev se liší.

## **2.2 Tranzistory**

U tranzistorových konců je filozofie návrhu opět odlišná. Vzhledem k možnostem. Koncové zesilovače s výstupním výkonem v řádech stovek wattů jsou naprosto běžné, jejich konstrukce bývají složité. Od různých kmitočtových, tepelných a jiných kompenzací přes několikanásobné zpětné vazby. To vše se snahou minimalizovat zkreslení, které běžně dosahuje setin procenta. Vzhledem k velkému zesílení není problém dosáhnout vysoké hodnoty odstupe signálu a šumu. Výjimkou nejsou ani konstrukce s odstupem kolem 120dB. Například česká produkce pana Dudka nebo Federmanna.

Celé tyto konstrukce sebou nesou i různá úskalí. Cesta signálu takovým zesilovačem není vzhledem k počtu součástek jednoduchá a stává se, že i přes výborné parametry zařízení se zvuk ve složitých pasážích jeví nejasný či zastřený. Na konstrukcích konečných reprosoustav s několikanásobnými reproduktory a frekvenčními filtry se znatelněji projeví vliv Dumping (někdy uváděno jako Damping) faktoru. Což je vlastně indukce proudu při vracení membrány reproduktoru, který se na množství součástek v pasivních filtrech více projeví, někdy i rezonancí a výstup zesilovače toto musí zpětně pojmout.

## **2.3 Integrované obvody**

Integrované zesilovače se poprvé objevili před necelými 30ti lety. Výhody integrovaných zesilovačů, jako např. vysoká hustota součástek a tím i minimální rozměry, vysoká spolehlivost a jednoduchá montáž přispěly k jejich rychlému rozšíření, dále jejich masová produkce a tím i stále se snižující ceny. Používání integrovaných zesilovačů vedlo ke zlepšování technických parametrů přístrojů spotřební elektroniky. Pro konstruktéry představuje použití integrovaných výkonových zesilovačů také minimalizaci celkového počtu elektronických součástek. Všechny

tyto výhody však končí na výstupních výkonech stovky wattů s využitím můstkového zapojení. Pokud se však zajímáme o nejmenší možné zkreslení nízkofrekvenčního zpracovávaného signálu, případně frekvenčního rozsahu zesilovače, budou parametry integrovaných zesilovačů v tomto ohledu zklamáním.

## 3 NÁVRH A REALIZACE DVOJČINNÉHO VÝKONOVÉHO ZESILOVAČ.

### 3.1 Návrh schématu

Před návrhem zesilovače bylo stanoveno několik klíčových vlastností, od kterých se konstrukce dále odbíjí:

- Možnost použití na běžných vícepásmových reproduktorech a z toho vyplývající výkon v řádu desítek wattů.
- Použití běžně dostupných komponentů bez drahé zakázkové výroby.
- Dostatečná vstupní citlivost pro použití i s gramofonem bez nutnosti doplnění o předzesilovač.

#### 3.1.1 Zesilovač

Základní komponenty byly použity z katalogu firmy GES elektro. Dodavatel elektronek slovenské firmy JJ-electronic a polského výrobce transformátorů INDEL.

Na základě výše uvedených požadavků a možnostech dodavatele bylo rozhodnuto pro realizaci dvojčinného zesilovače v B třídě s koncovými elektronkami EL34. Dnes často používanými v kytarových zesilovačích, nebo dříve třeba v zesilovači TESLA mono 50.

Výstupní transformátor byl vybrán z katalogu GESu typ TGL 60/001 s parametry:

- $R_{aa}=3k\Omega$ ,
- $P_o=60W$ ,  $R_z=4\Omega$ ,
- $50Hz \div 12kHz$ .

Tento svými parametry odpovídá i katalogovým údajům pro dvojčinné zapojení a návrh se tím o něco zjednoduší, viz příloha č1. strana 15. Datasheet EL34 Philips.

Vzhledem k přenosu výstupního transformátoru, bude využito zpětné vazby k dosažení lepších výsledků



Předpětí na stínici mřížku  $G_1$  ( často označováno jako BIAS ) je řešeno ze samostatného zdroje a nastavuje se pro každou elektronku zvlášť trimry R33 a R34, není tedy nutné použití párované dvojice. Trimry je ovšem nutné použít více otáčkové. Předpětí se nastaví tak aby klidový proud každé z elektronek byl 25-30mA. To odpovídá předpětí cca -38 až -39V.

Při návrhu výkonového zesilovače se postupuje tak, že je nejprve celková zpětná vazba zanedbána, a zesilovač navrhnut tak, aby měl bez zpětné vazby takové zesílení, že k plnému vybuzení stačí již  $1/5$  až  $1/20$  signálu, který je k dispozici z výstupu řídicího zesilovače. Pak je teprve navržena větev zpětné vazby. Tedy dělič tvořen odporem R12 a RC článkem R13 a C23. Jejichž hodnoty jsou nastaveny podle měření, chování zesilovače a jeho požadované přesné vstupní citlivosti. V tomto případě je  $R13 = 4k\Omega$  a  $C23 = 220pF$ .

Jako invertor bylo použito zapojení s katodovou vazbou pro svou výhodu dostatečného zesílení, čímž se na rozdíl od invertoru s rozdělenou zátěží ušetřil další pár elektronek i vazebních kondenzátorů, na kterých by docházelo k dalšímu zkreslení.

Pro vstupní odpory platí:

$$U_g = U - R_k(I_a + \dot{I}_a)$$

$$\dot{U}_g = -R_k(I_a + \dot{I}_a)$$

Pro výstupní odpory platí:

$$\mu U_g - (R_i + R_a)I_a - R_k(I_a + \dot{I}_a) = 0$$

$$\mu \dot{U}_g - (R_i + R_a)\dot{I}_a - R_k(I_a + \dot{I}_a) = 0$$

Řešením těchto rovnic dostaneme:

$$U_2 = -R_a I_a = -U_1 \frac{\mu R_a}{R_i + R_a} \frac{R_i + R_a + R_k(\mu + 1)}{R_i + R_a + 2R_k(\mu + 1)}$$

$$\dot{U}_2 = -R_a \dot{I}_a = -U_1 \frac{\mu R_a}{R_i + R_a} \frac{R_k(\mu + 1)}{R_i + R_a + 2R_k(\mu + 1)}$$

celkové zesílení je tedy:

$$|A| = \frac{U_2 - \dot{U}_2}{U_1} = \frac{\mu R_a}{R_i + R_a} \frac{R_i + R_a + R_k(\mu + 1)}{R_i + R_a + 2R_k(\mu + 1)} = \frac{\mu R_a}{R_i + R_a}$$

Zesílení tedy nezávisí na velikosti katodového odporu  $R_k$  a je stejné jako v případě jedné elektronky s vazebním odporem  $R_a$ . Poměrná souměrnost je:

$$\frac{\dot{U}_2}{U_2} = -\frac{R_k(\mu+1)}{R_i + R_a + 2R_k(\mu+1)}$$

Má-li být tento výraz co nejbližší -1, je třeba, aby člen  $R_k(\mu+1)$  byl mnohem větší než  $(R_i+R_a)$ . U elektronky s velkým zesilovacím činitelem to lze splnit, použijeme tedy ECC83S s parametry:  $\mu = 100$ ,  $R_i = 70k\Omega$  při  $R_a = 100 k\Omega$ , více v příloze č 2 Datasheet ECC83S JJ-electronic. K dosažení poměrné souměrnosti 0,975 je nutný odpor:

$$-0,975 = -\frac{R_k \cdot 101}{170000 + R_k \cdot 101} \dots \rightarrow R_k = 66k\Omega$$

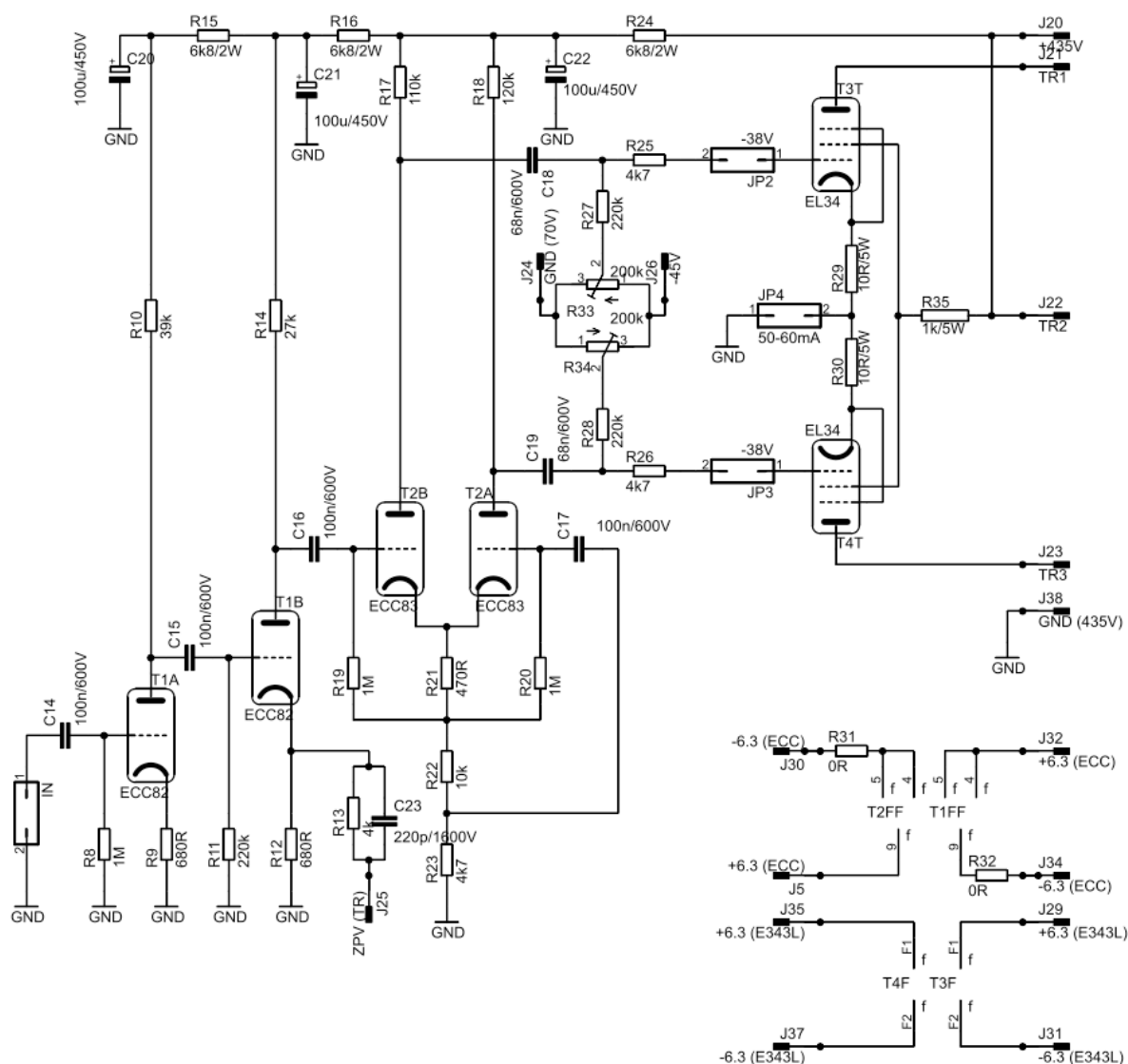
Souměrnost lze tedy libovolně zlepšit volbou dostatečně velkého odporu  $R_k$ . Nevýhodou však je, že se tím zmenšuje anodové napětí elektronek a tím zmenšuje výstupní napětí, které mohou dodat. Proto je lepší spokojit se s horší souměrností a vyrovnat ji volbou poněkud odlišných anodových odporů. R17 a R18, odpor R24 slouží k nastavení anodového napětí a katodový odpor  $R_k$  je zmenšen a rozdělen na R21 – R23.

Vstupní díl se zpětnou vazbou zapojenou do katody je řešen jednoduchým odporovým zesilovačem pomocí jedné půlky elektronky ECC82. Její druhá půlka je vyžita jako předzesilovač pro dosažení potřebné vstupní citlivosti. Odporů R15 a R16 nastavují anodové napětí. Odporů  $R_g$  u všech elektronek tedy R8, R11, R19 a R20 volíme v rozmezí stovek  $k\Omega$  až jednotek  $M\Omega$ . Anodové odpory R10 a R14 i katodové odpory R9 a R12, volíme podle převodní charakteristiky viz příloha č. 3 Datasheet ECC82 JJ-electronic.

Vazební kondenzátory mezi jednotlivými stupni musí mít malý svod, protože s mřížkovým odporem tvoří dělič kladného napětí a působí proti mřížkovému předpětí. Zvolí se fóliové polypropylenové kondenzátory Orange Drops 716P.

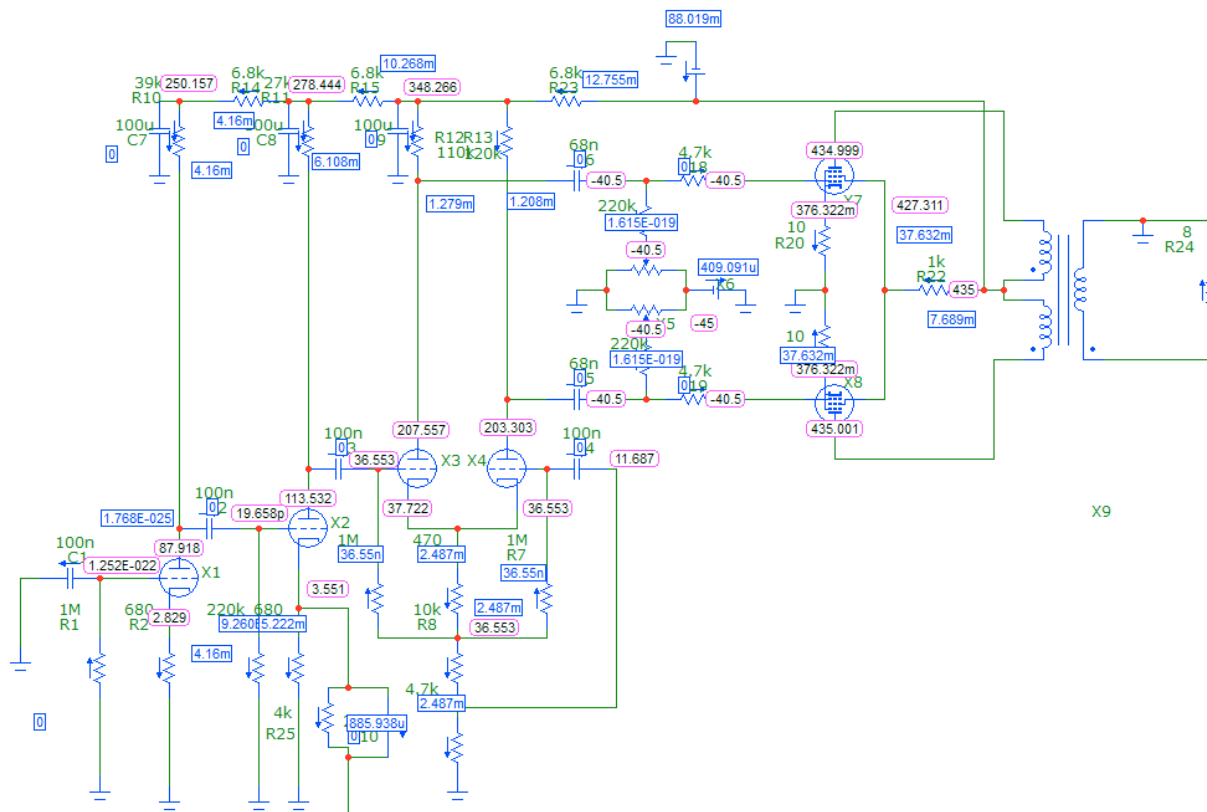
Regulace hlasitosti je řešena stereofonním logaritmickým potenciometrem s hodnotou  $25k\Omega$ , který vzhledem k velké vstupní impedanci elektronek udává vstupní impedanci celého zesilovače. Větší hodnota potenciometru způsobovala v kombinaci se vstupními kapacitami

elektronky RC člen omezující přenos vyšších kmitočtů a velkou náchylnost k indukci rušivého napětí na přívodních vodičích.



*Obr. 22 Schéma výkonového zesilovače*

Nastavení pracovních bodů bylo ověřeno i simulací v programu Micro-Cap 9



*Obr. 23 náhled na simulační model*

### 3.1.2 Zdroj

K zajištění správné funkce je třeba zajistit tato napětí:

- 435V min 250mA anodové napětí
- 40-50V 5mA zajištění záporného předpětí koncových elektronek
- 6,3V min 4,4A žhavení elektronek

K těmto požadavkům se nejvíce blíží síťový transformátor MTR-40W-2 opět z katalogu společnosti GES elektro s parametry:

Primární vinutí 230V

Sekundární vinutí: 320V/0,35A

6,3V/3,6A

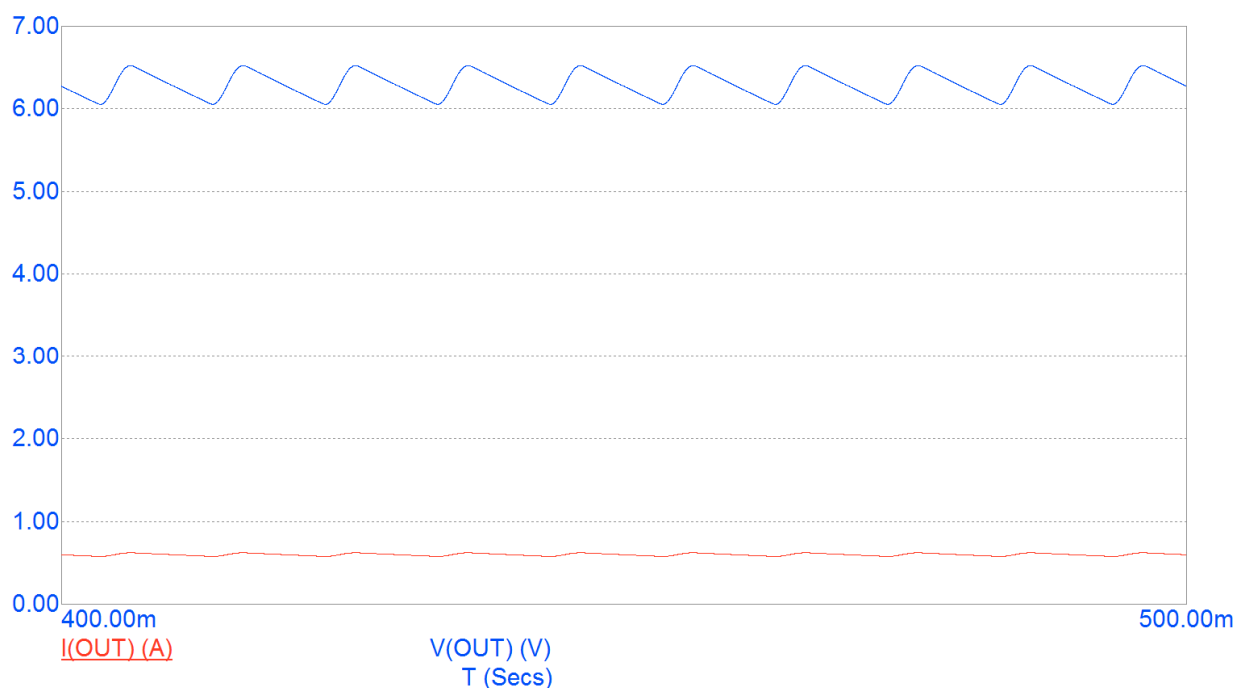
6,3V/1,1A

45V/0,05A

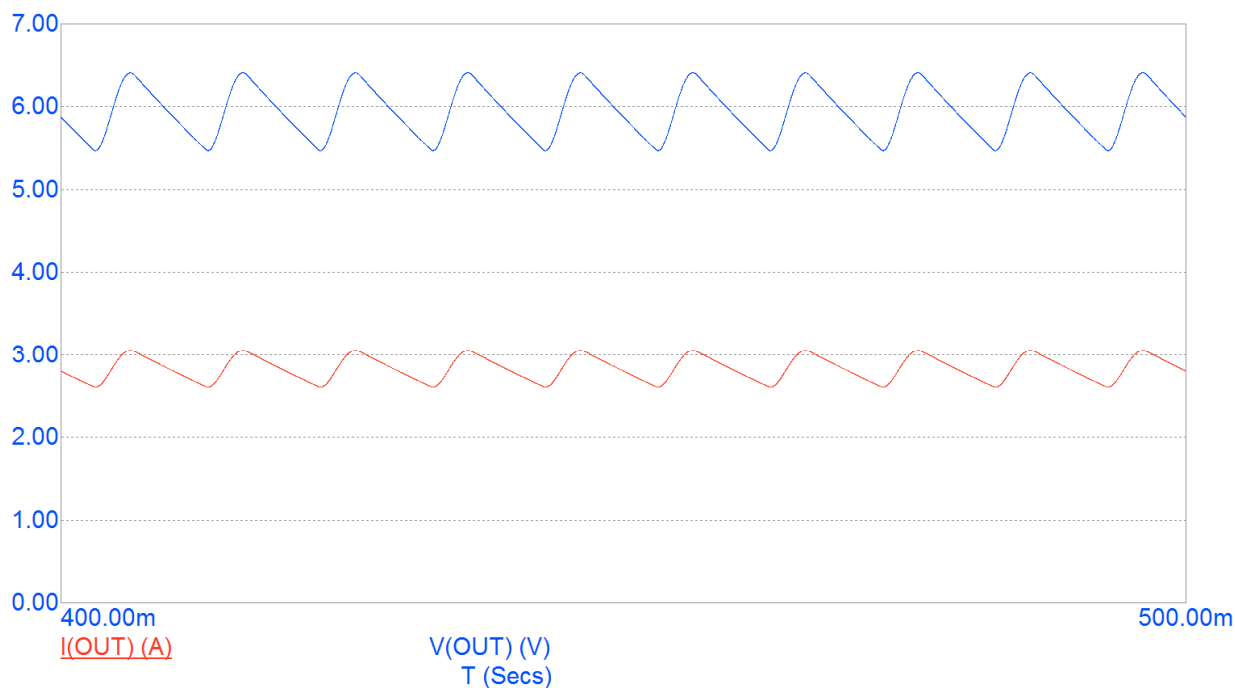
Vzhledem k uvedeným parametrům je nutné použít transformátor pro každý kanál zvlášť, což vede k navýšení ceny hmotnosti i složitosti, hlavně z důvodu realizace dvou samostatných a dostatečně dimenzovaných filtrací. Nespornou výhodou takového zapojení je minimální vzájemný vliv jednotlivých kanálů a tím omezení přeslechů.

Žhavicí napětí je také o něco komplikovanější s ohledem na dvě samostatná vinutí transformátoru a jeho nízké napětí, je nemožné použít běžné prostředky pro jeho stabilizaci. Jedním z řešení je nechat žhavení rozdělené na dvě samostatné větve. Jednu pro budící elektronky a druhou pro koncové. Vznikne tím požadavek na 6,3V min 600mA a 6,3V min 3A který je možné realizovat. Z důvodu omezení brumu je vhodné řešit žhavení jako stejnosměrné s dostatečnou filtrací, při dodržení přesnosti napětí  $\pm 5\%$

Obě větve žhavicího napětí jsou dvoucestně usměrněny a vyfiltrovány jednoduchým kapacitním filtrem. Hodnota výstupního napětí je dána úbytkem na usměrňovacích diodách a kapacitou filtračních kondenzátorů navržených pomoci simulace. Odporů R3 až R6 pomáhají omezit brum. Žhavení je vedeno ke každé elektronce samostatným krouceným vodičem.

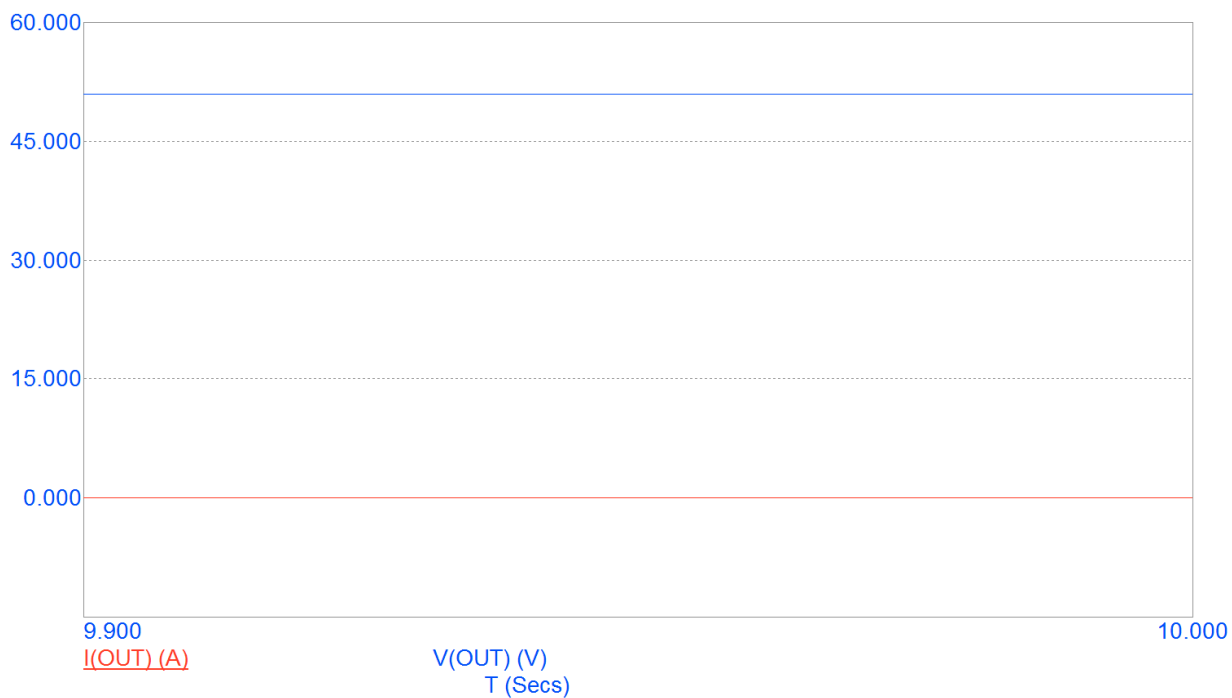


Obr. 24 simulace žhavení pro budící elektronky



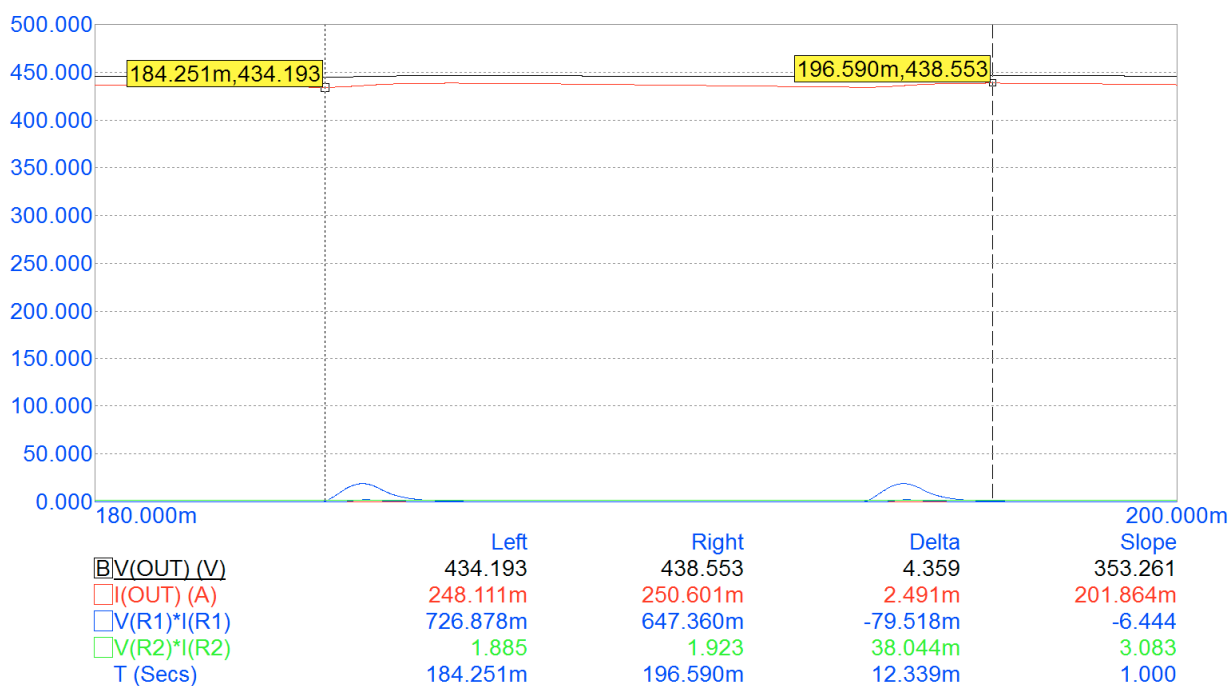
*Obr. 24 simulace žhavení pro koncové elektronky*

Předpětí pro řídicí mřížku nevyžaduje nikterak velký proud, ale má velké nároky na stabilitu. Kolísání by se přímo projevilo na nestabilitě klidového proudu. Díky malému proudu stačí stabilizace RC článkem zapojeným jako  $\pi$  člen



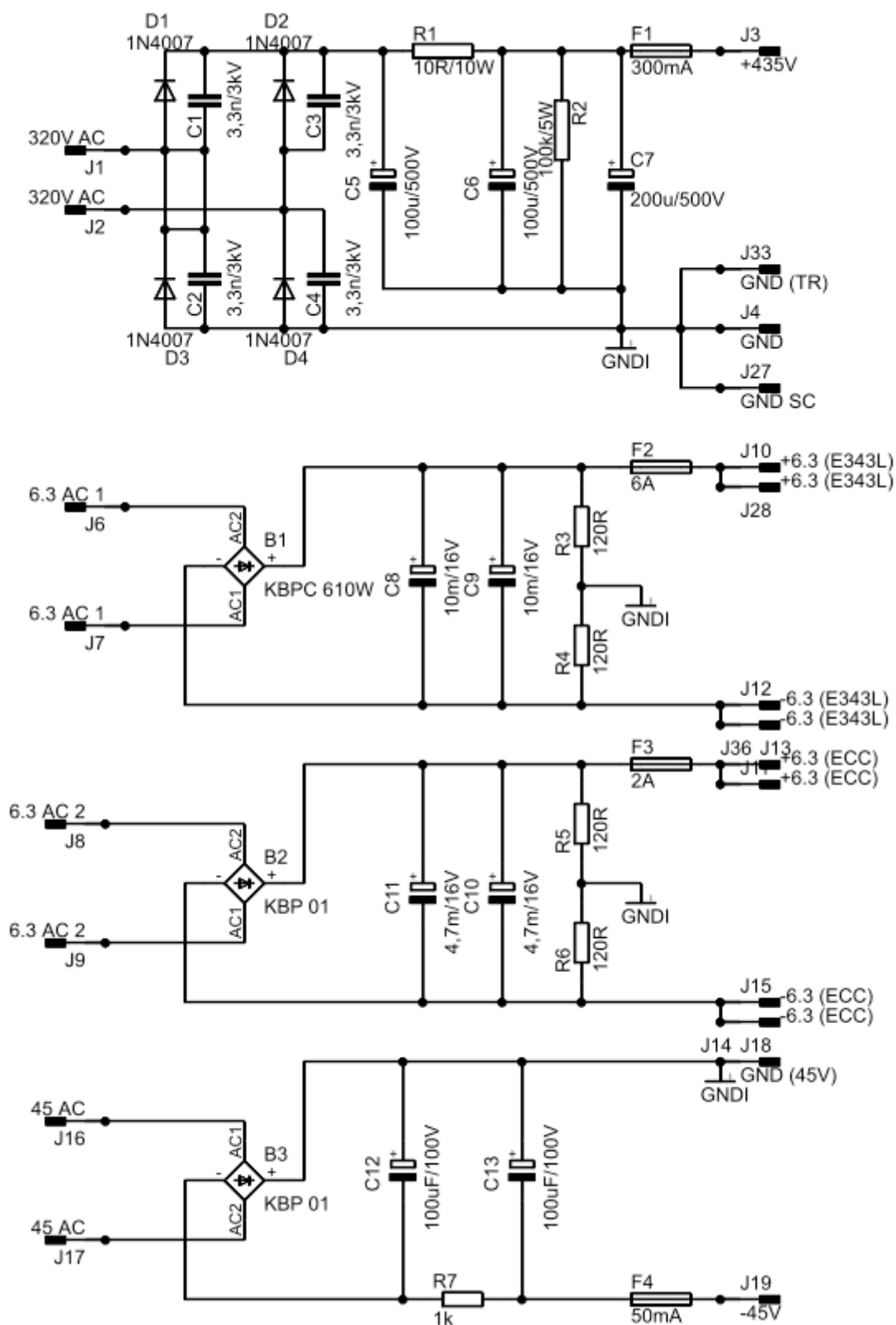
*Obr. 25 simulace předpětí při odběru 10mA*

Důležitá je také kvalitní filtrace anodového napětí. V původních konstrukcích se používaly velké tlumivky v řádu jednotek Henry, Velikostně srovnatelné se sítovým transformátorem. Ty jsou dnes běžně nesehnatelné a už teď těžkou konstrukci by činily ještě objemnější. Usměrňovací můstek D1 až D4 je tvořen diodami 1N4007 se závěrným napětím 1kV a ke každé jsou paralelně připojeny kondenzátory C1 až C4 pro zachycení špiček při spínání diod. Samotná filtrace je opět řešena RC článkem zapojeným jako  $\pi$  člen doplněným o vybíjecí odpor a další filtrační kondenzátor.



Obr. 26 Simulace anodového napětí při zatížení 70mA a 300mA

Podle výpočtů v simulaci vychází zvlnění při maximálním zatížení 4,36V tedy asi 1% Vzhledem k faktu že každá z elektronek v budicím stupni má na napájecí cestě ještě vlastní filtrační kondenzátor a koncové elektronky jsou napájeny přes indukčnost výstupního transformátoru. Je toto zvlnění přijatelné.



Obr. 27 Schéma zdroje

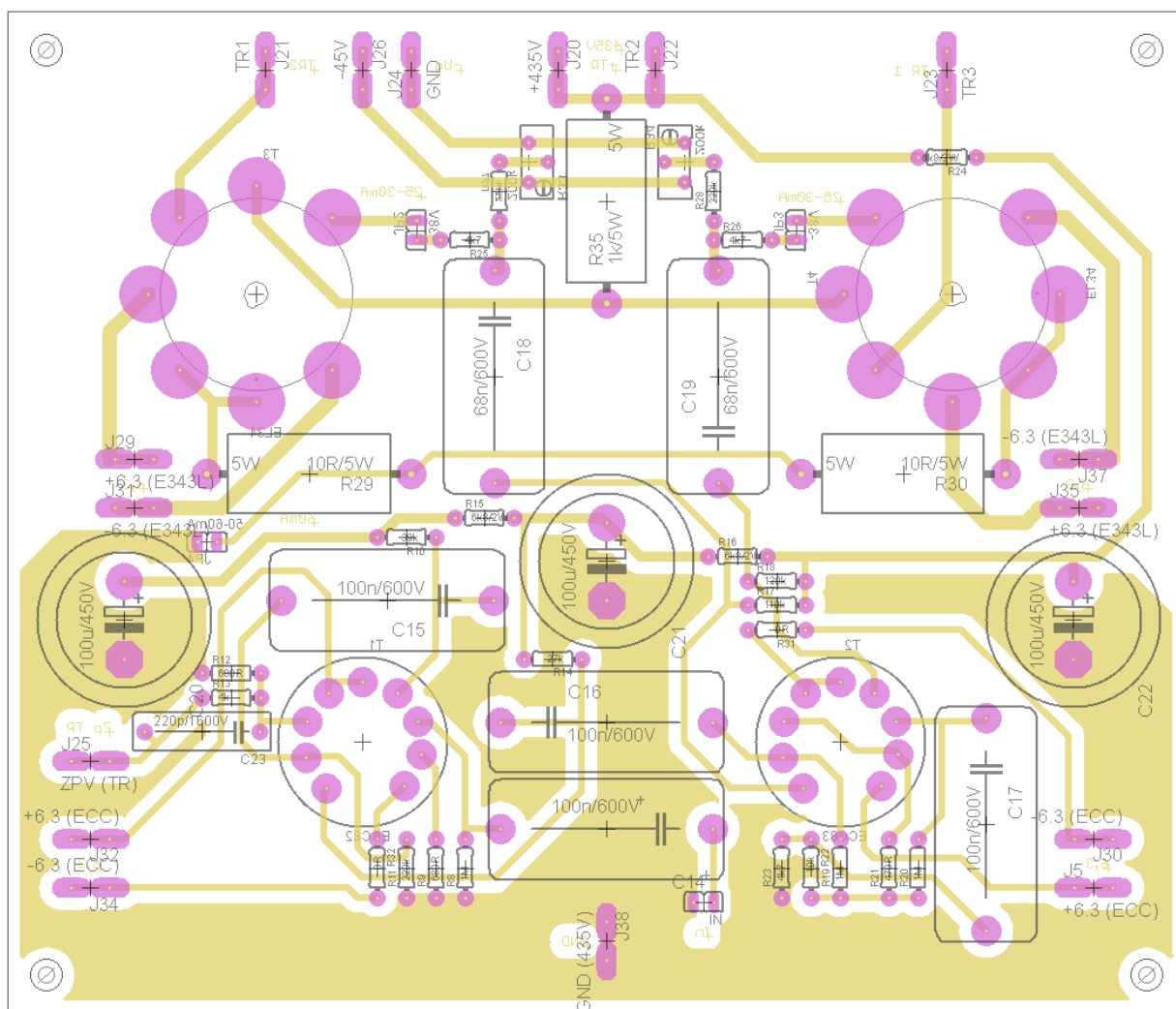


## 3.2 Návrh desek plošných spojů

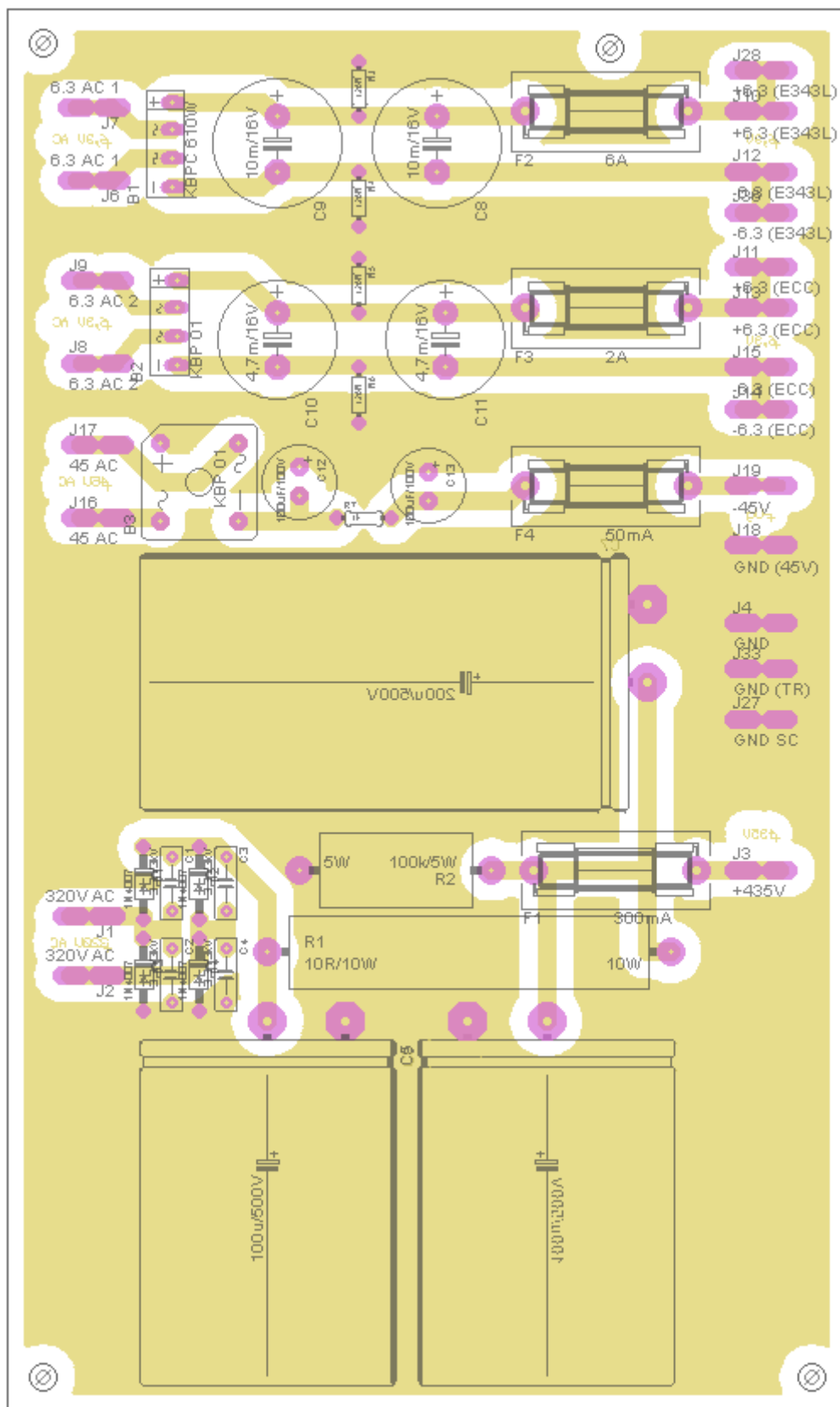
Ještě před návrhem samotných desek plošných spojů je třeba mít alespoň představu, jak bude celá konstrukce rozmístěna, aby nebyl vstup zarušen rozptylovými proudy transformátorů

Při návrhu plošných spojů je třeba počítat s velkou náchylností elektronek k vzájemnému rušení, které je způsobeno kombinací velkého vstupního odporu a pracovního napětí v řádu stovek volt. Proti vzniku zemních smyček jsou země rozděleny na signálovou, napájecí a výkonovou. Všechny tyto pak uzemněny do jednoho bodu co nejbližší napájecího zdroje. Vstupní signál je přiveden stíněným vodičem. Z důvodu montáže a přístupu jsou patice pro elektronky pájeny ze strany mědi.

Návrh byl realizován v programu EAGLE, který je jako demoverze součástí přílohy na CD. Celý návrh desky plošných spojů a osazovací plán v měřítku 1:1 jsou v příloze č 4.



Obr. 28 náhled na DPS výkonového zesilovače

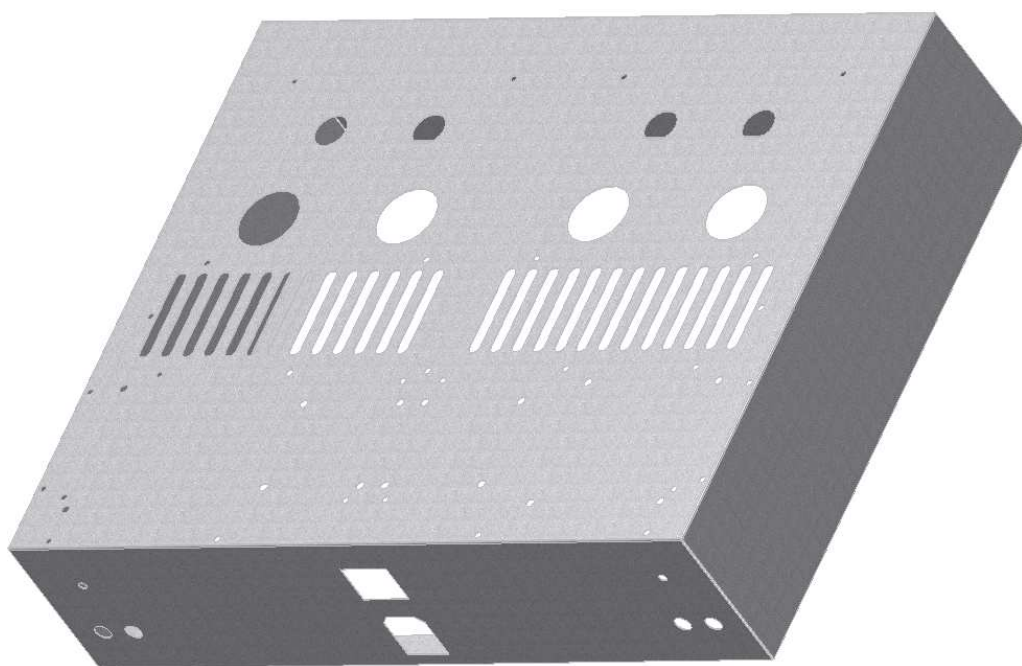


Obr. 29 náhled na DPS napájecího zdroje

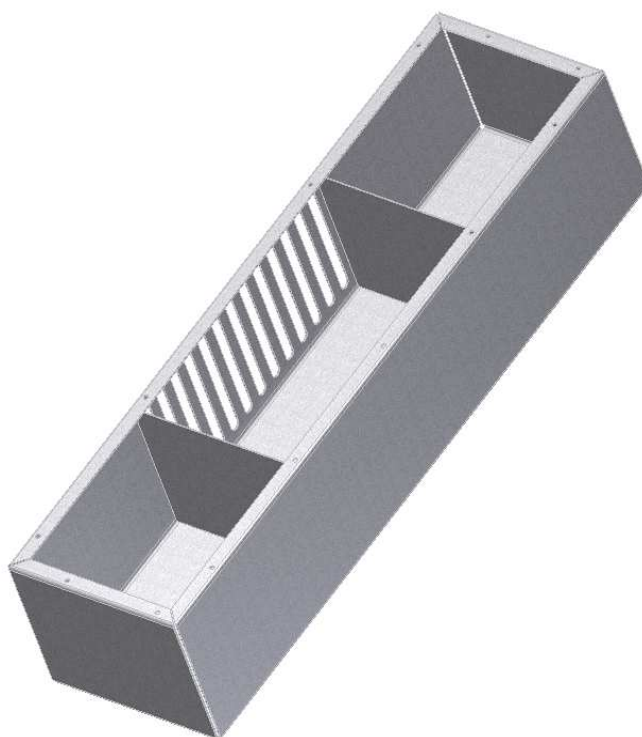
43

### 3.3 Návrh šasi

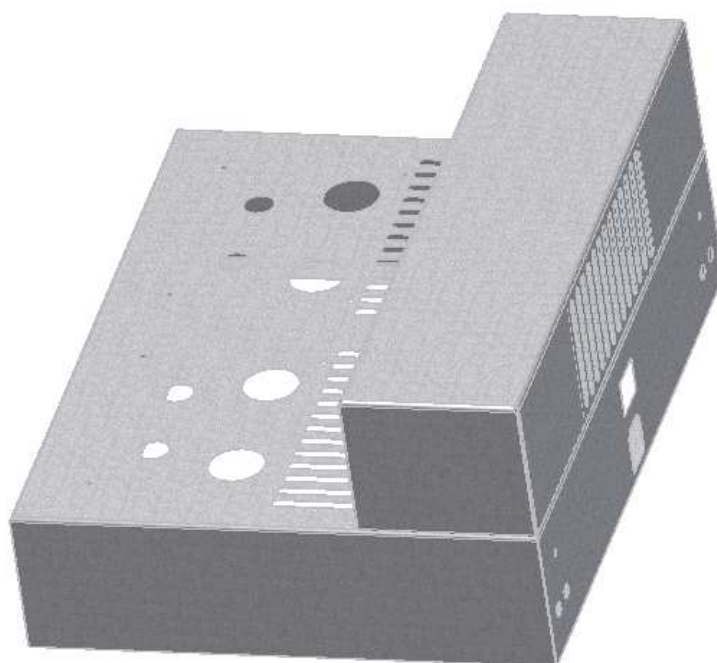
Šasi bylo navrženo s ohledem na hmotnost jednotlivých komponent a jejich vzájemné odstínění. Jako základ byl použit ocelový plech o tloušťce 1mm, který má vzhledem k výslednému polozavřenému profilu dostatečnou pevnost. Všechny plošné spoje jsou z důvodu dostupnosti součástek a chlazení elektroniky přišroubovány přes plastové distanční sloupky zespod na spodní část tohoto dílu. Transformátory jsou na tento díl přišroubovány z vrchu a vzájemně stíněny přepážkami. Pro menší rušení jsou výstupní a síťový transformátor vzájemně otočeny o 90°. Kompletní výkresová dokumentace je v příloze č. 5 a návrh v programu Autodesk Inventor v elektronické podobě je přiložen na CD.



*Obr. 31 náhled na model spodní části*



*Obr. 32 náhled na model stínění transformátorů s přepážkami*



*Obr. 33 náhled na model sestaveného šasi*

## 4 MĚŘENÍ TECHNICKÝCH PARAMETRŮ.

Existuje názor, že potřebný frekvenční rozsah začíná nad 20Hz a končí pod 20kHz. Profesor James Boyk se dlouhodobě zabýval vyššími harmonickými. Přes omezení na 102,4kHz, které bylo zapříčiněno rozsahem použitých přístrojů, jeho měření jasně dokladují, že v každé skupině hudebních nástrojů je alespoň jeden hudební nástroj, který svým frekvenčním rozsahem přesahuje hranici 102,4kHz.

U některých hudebních nástrojů je výkon nad akustickým pásmem až neskutečný. Největší podíl mají činely se svými 40% či cinkání klíči se svými 68%.

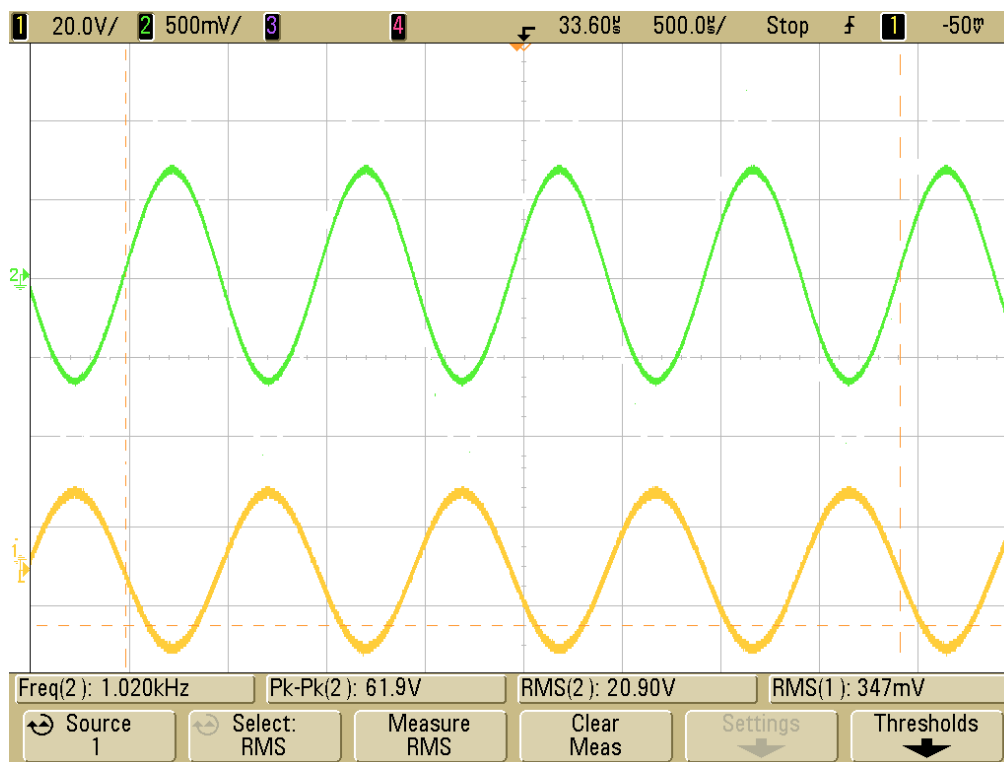
Kmitočty nad akustickým pásmem jsou neslyšitelné, ale pokud jsou součástí kmitočtů v akustickém pásmu, pak udávají jejich barvu. Pokud takové kmitočty potlačíme, pak o barvu tónů přicházíme a posluchač to pozoruje, jako formu zkreslení. Pokud naopak takové kmitočty přidáme, vzniká nám rovněž zkreslení původního signálu.

Zkreslení je nějakým způsobem měřitelné, ale hranice slyšitelnosti je různá. Jen málokdo pozná zkreslený signál a měl by problém s řádem 1%, ale samotná změna, rychlé nasazení zkreslení je velmi rušivé a posluchač je citlivý již na tisíce a vnímá frekvence řádu několika set kilo herc.

### 4.1 Výstupní výkon

Výstupní výkon je dnes takřka první, ale ne nejdůležitější věc, na kterou se při výběru zaměřujeme. Pro dosažení maximálního akustického tlaku asi 110dB je při použití reproduktorů s citlivostí 85 dB/1 W potřeba cca 100W u reproduktorů 90 dB/1 W cca 30-50W a pro soustavy s citlivostí 100 až 105 dB/1 W postačí 10W

Realizovaná konstrukce umožňuje trvale dodat do zátěže  $R_z = 8\Omega$  efektivní napětí  $U_{rms} = 20V$ . To odpovídá výkonu  $P = 50W$  na každý kanál. Maximální rozkmit výstupního napětí  $U_{pp} = 60V$  v celém akustickém pásmu, vše při vstupním napětí  $U_{inRMS} = 330mV$  ( $U_{inPP} = 1V$ )

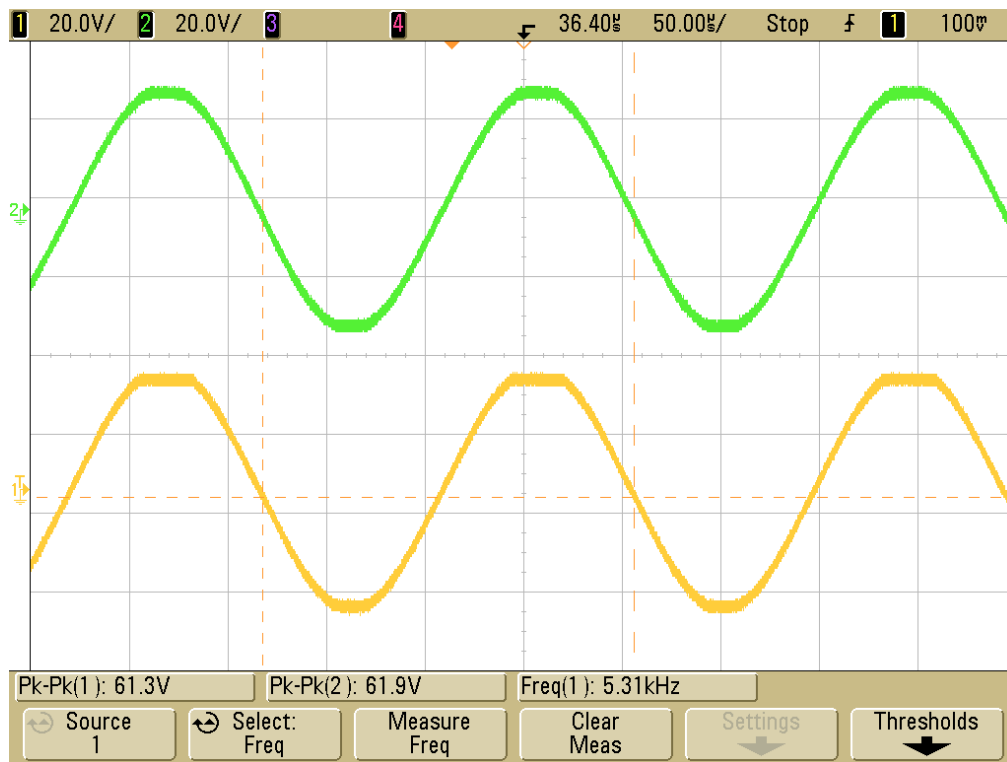


*Obr. 34 Vstupní (Ch1) a výstupní (Ch2) signál*

Fázový posuv mezi vstupem a výstupem je způsoben výstupním transformátorem.

## 4.2 Chování v limitaci

Pokud bude zesilovač přebuzen nad hranici výstupního rozkmitu do oblasti limitace, mohou se projevit nedostatky ve zpětné vazbě. Nejčastěji se chyby projeví jako nesymetrické zákmity těsně za maximem.



*Obr. 35 Chování v limitaci (oba kanály)*

Na průbězích jsou viditelné pouze uříznuté vrcholy period vlivem překročení maximálního rozkmitu koncových elektronek bez známky dalších potíží.

### 4.3 Odstup signálu a šumu

Důležitým parametrem zesilovače je odstup rušivých signálů od užitečného. Často označovaný jako S/N. Definován jako podíl rušivého napětí k výstupnímu v dB.

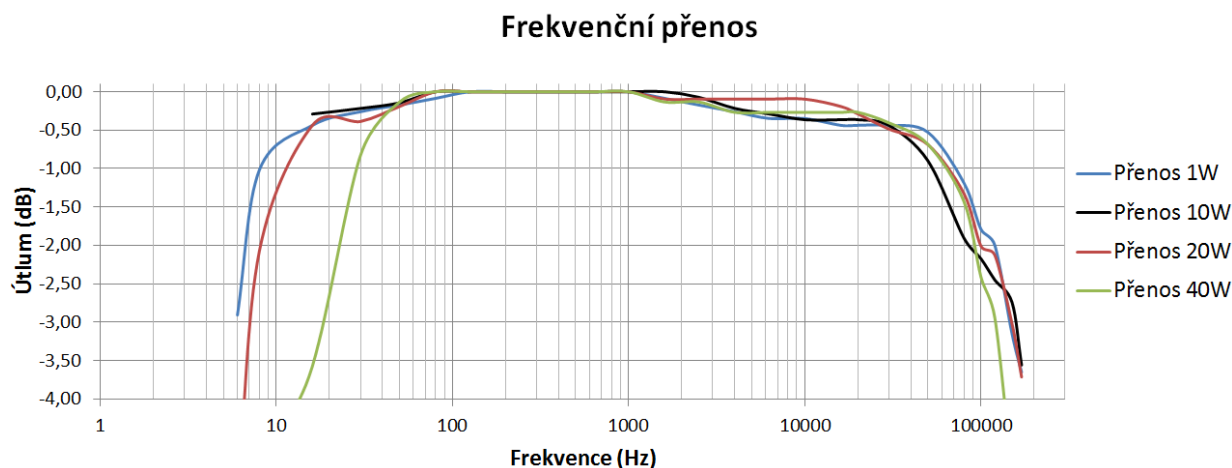
U této konstrukce bylo naměřeno rušivé napětí 0,4mV

$$S/N = 20 \log \frac{U_r}{U_{RMS}} = \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{20,9} = \underline{94dB}$$

### 4.4 Frekvenční charakteristika

Jak už bylo zmíněno šířka přenosového pásma a to i nad hranicí 20kHz, hraje v určení kvalit zesilovače podstatnou roli.





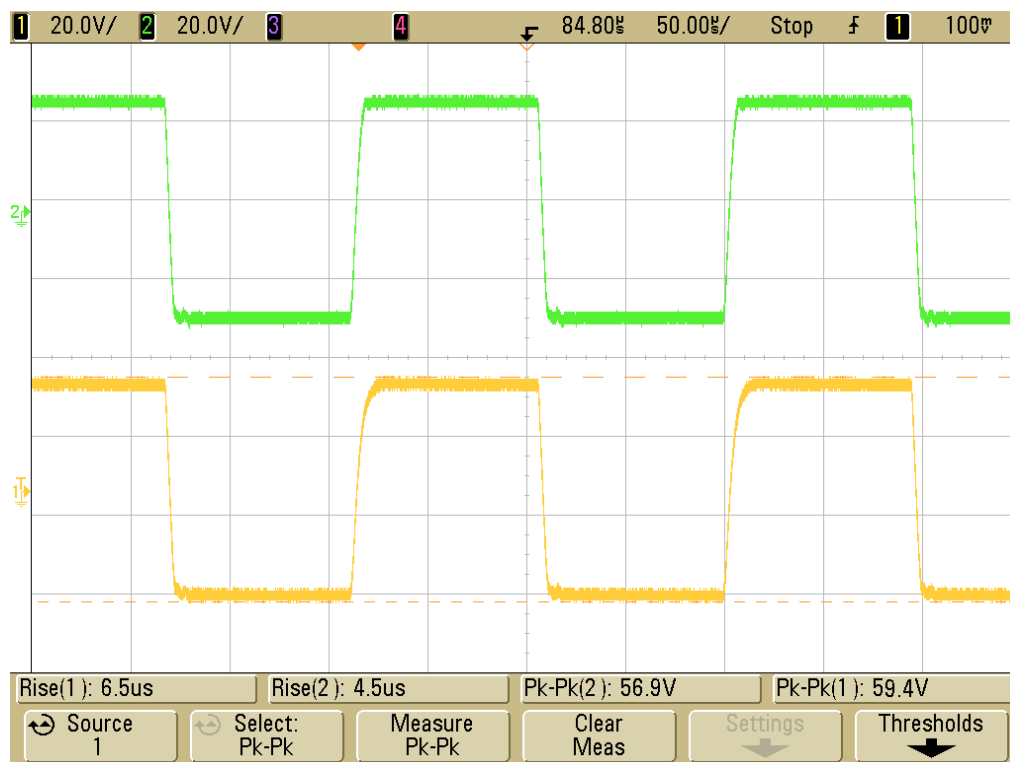
*Obr. 35 Frekvenční přenos pro vybrané výstupní výkony*

Vzhledem k udávanému přenosu transformátoru 40Hz-16kHz se podařilo dosáhnout hodnot daleko lepších. Frekvenční rozsah je možné po vzoru komerčních výrobků napsat jako:

6Hz – 130kHz -3dB 6W a 8Hz – 72kHz -1dB 12W

## 4.5 Rychlost přeběhu a stabilita

S přenosovým pásmem úzce souvisí i rychlost přeběhu a stabilita. Pro zvýšení rychlosti přeběhu je třeba zvýšit počet přenesených harmonických, ale zvyšování frekvenčního rozsahu sebou nese problematiku přenosu i rušivých signálů. Chování je dobře pozorovatelné na obdélníkovém průběhu



Obr. 36 rychlost přeběhu

Zde jsou měřeny oba kanály zároveň a je vidět že z důvodu toleranci jednotlivých součástek, zejména elektronek, mají lehce odlišné chování.

Rychlost přeběhu dána vztahem:  $SR = \frac{U_{PP}}{t_r}$  je tedy 9,1V/μs a 12,6V/μs/V bez znatelných překmitů.

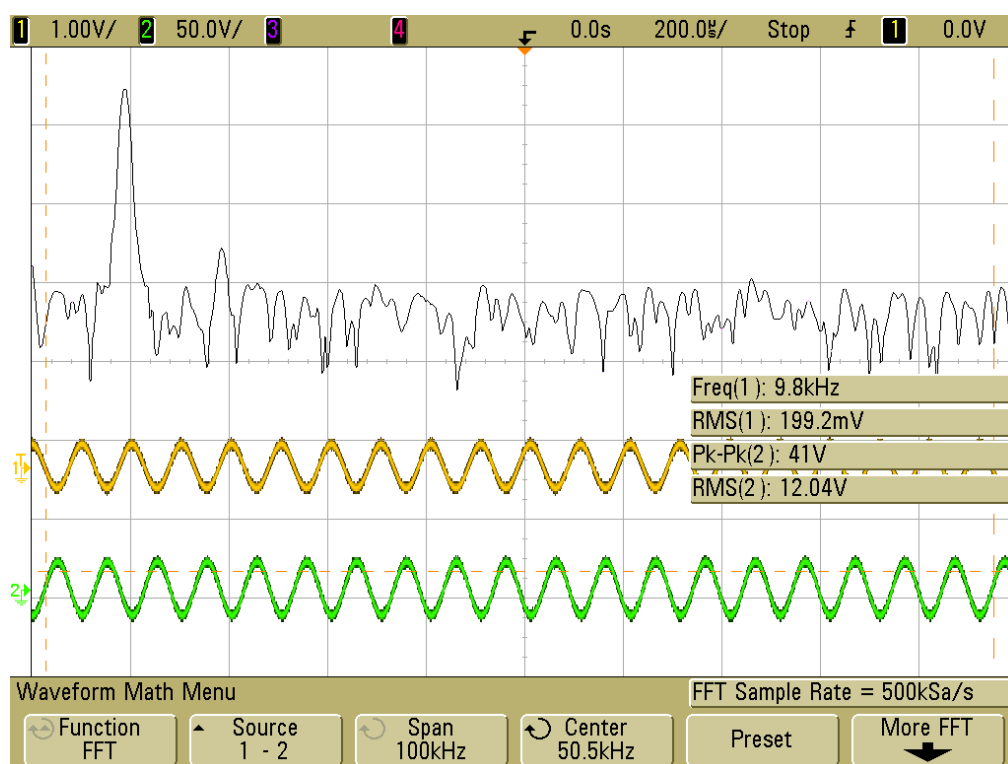
## 4.6 Přechodové zkreslení

V zesilovačích třídy B se může objevit takzvané přechodové zkreslení, na této konstrukci se ovšem neprojevuje v měřitelných mezích.

## 4.7 Harmonické zkreslení

Změřit harmonické zkreslení je vzhledem na požadovanou přesnost obtížné. Provádí se jako odečet první harmonické a následný součet všech následujících, kdy výsledné zkreslení je podílem těchto harmonických k první. Počítáno přes efektivní hodnotu napětí nebo výsledného výkonu. V praxi se používají přímo měřiče THD zkreslení, ke kterému v době měření nebyl přístup.

Pomocí osciloskopu s funkcí Fourierova rozvoje bylo možno zobrazit jednotlivé harmonické složky výstupního signálu, bez možnosti přesného určení jejich velikostí

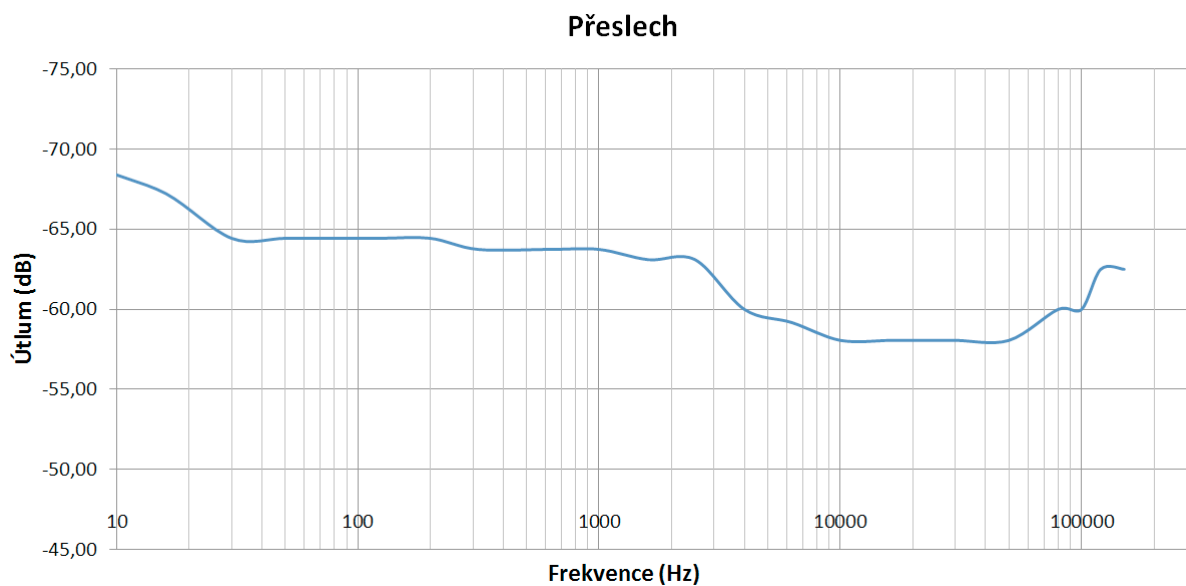


Obr. 37 Frekvenční rozklad zkresleného signálu.

Podle teorie má zkreslení elektronkových zesilovačů vyšší harmonické soustředěny v dolní části spektra a převažuje druhá harmonická, která představuje tón o oktávu vyšší a tento předpoklad je z měření patrný.

## 4.8 Přeslechy mezi kanály

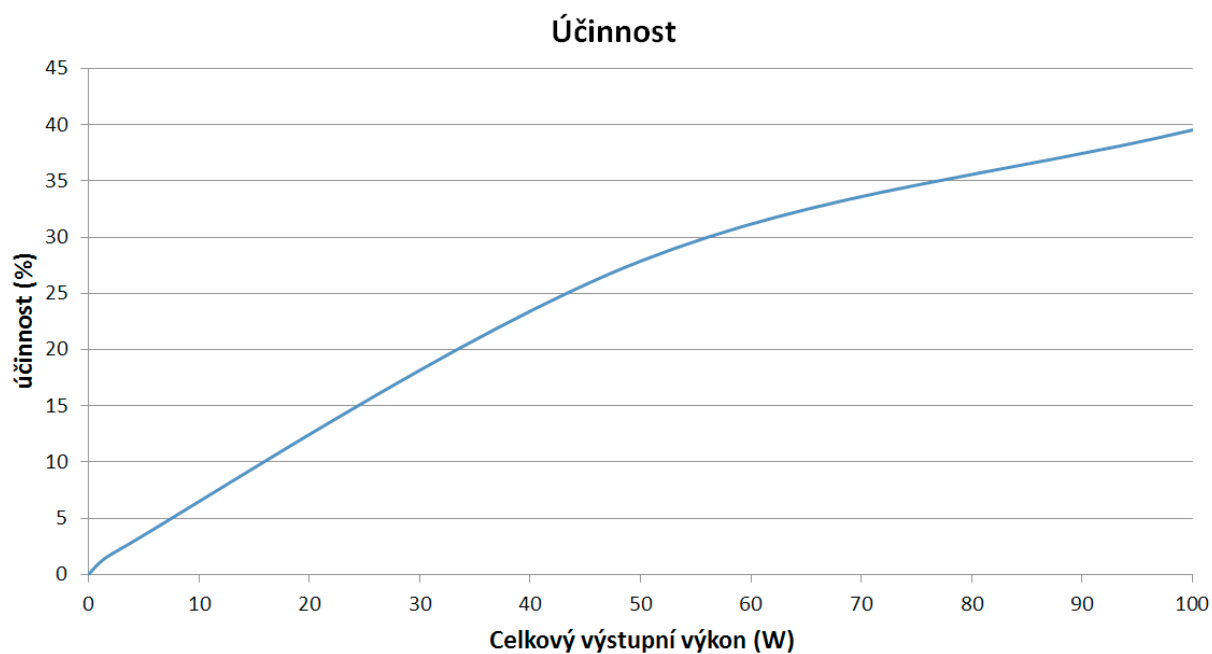
U více kanálových struktur je možnost přenosu signálu mezi jednotlivými stupni a vznik jevu zvaného přeslech, který ovlivňuje prostorové určení zvuku. Měří se jako podíl výstupní úrovně v dB mezi vybuzeným a nezapojeným kanálem.



*Obr. 38 Velikost přeslechu v závislosti na frekvenci*

## 4.9 Účinnost

Elektronkové zesilovače se přestaly používat převážně z důvodu jejich nízké účinnosti a potřeby relativně vysokého napětí, ve srovnání s tranzistory.

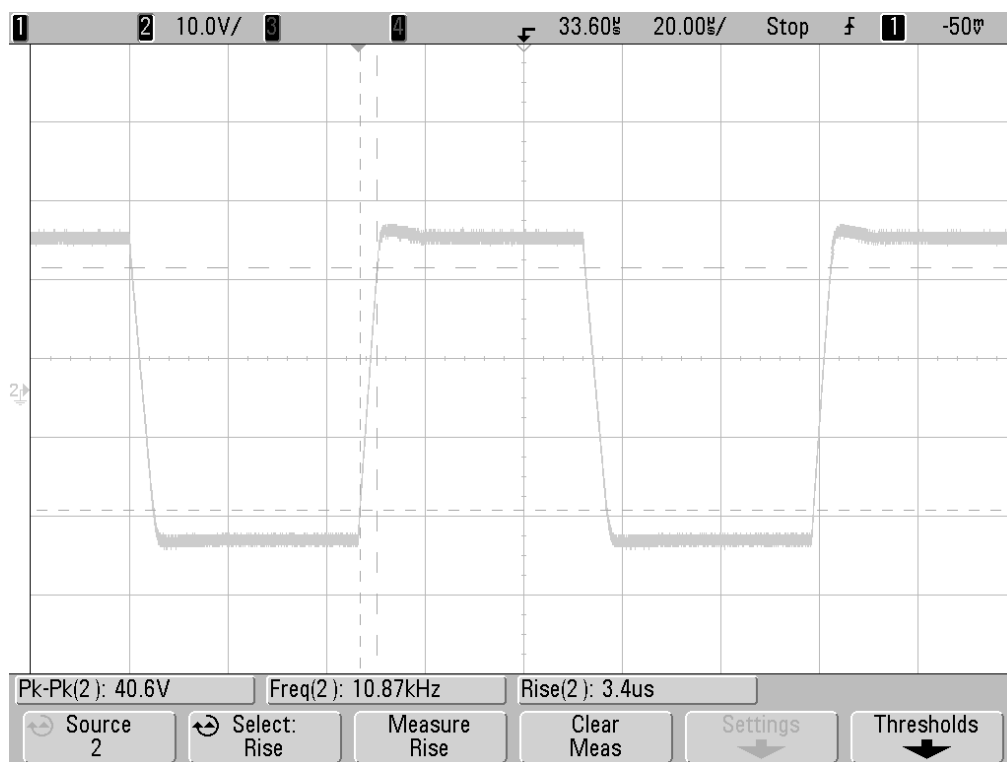


*Obr. 39 účinnost celé konstrukce*

Elektronky potřebují pro nastavení pracovního bodu relativně vysoké klidové proudy v porovnání s pracovními a bez ohledu na provozní stav musí neustále fungovat jejich žhavení. Tím je dán klidový odběr celé konstrukce 0,4A ze sítě a od toho se odvíjející křivka účinnosti.

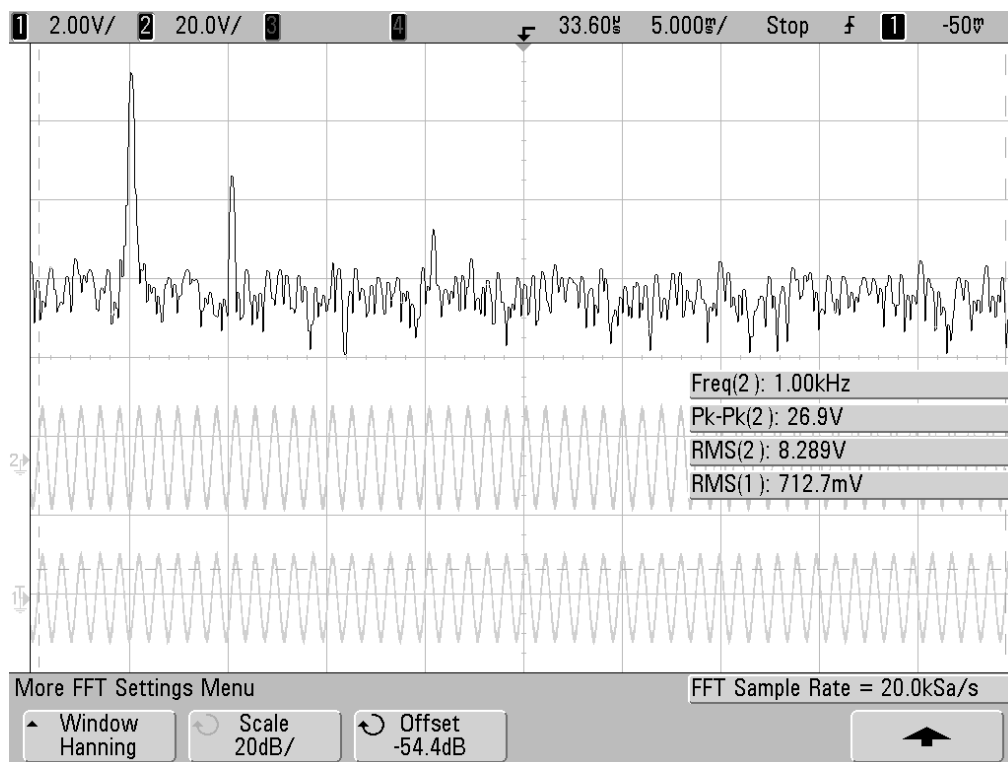
## 4.10 Porovnání s jinými zesilovači

Pro srovnání parametrů vyrobeného zesilovače budou v této kapitole uvedeny některé parametry jiných konstrukcí, které byly změřeny. Tedy dva zesilovače s integrovanými obvody TDA2052 a spínaný TDA8950



*Obr. 40 rychlost přeběhu TDA2052*

Tento integrovaný zesilovač má srovnatelnou rychlost přeběhu  $SR=11,6\mu s$  ovšem s mírným překmitem a přenosem 15Hz-90kHz -3dB

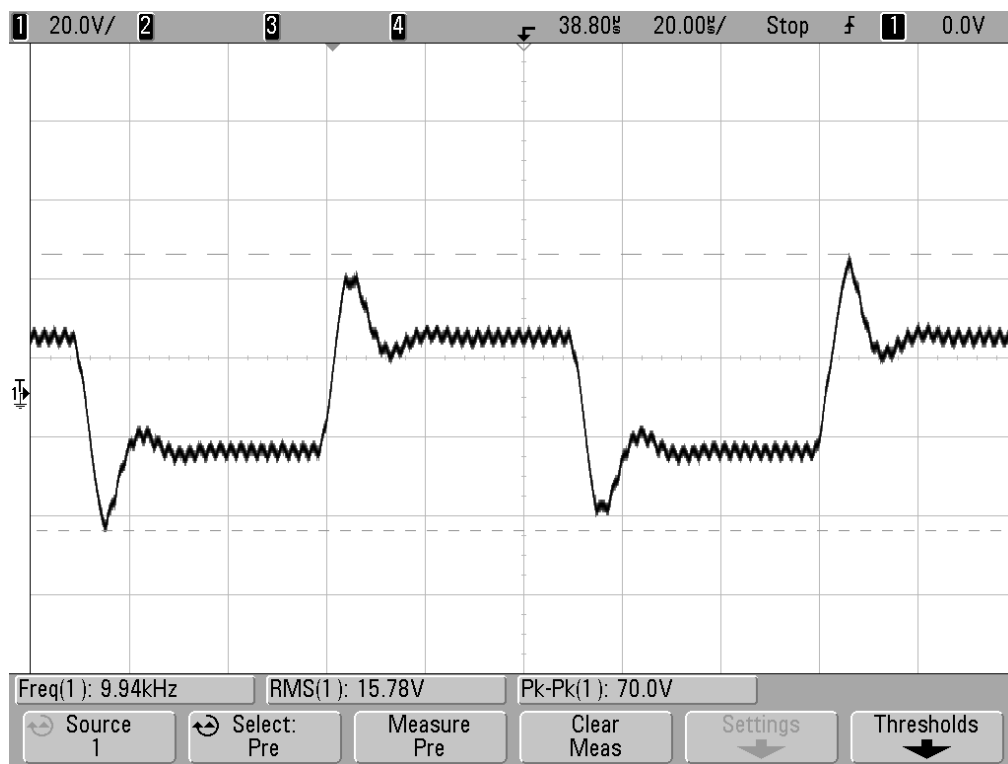


*Obr. 41 frekvenční rozklad zkresleného signálu*

Zde je dobře patrné rozložení zkreslení do více harmonických.

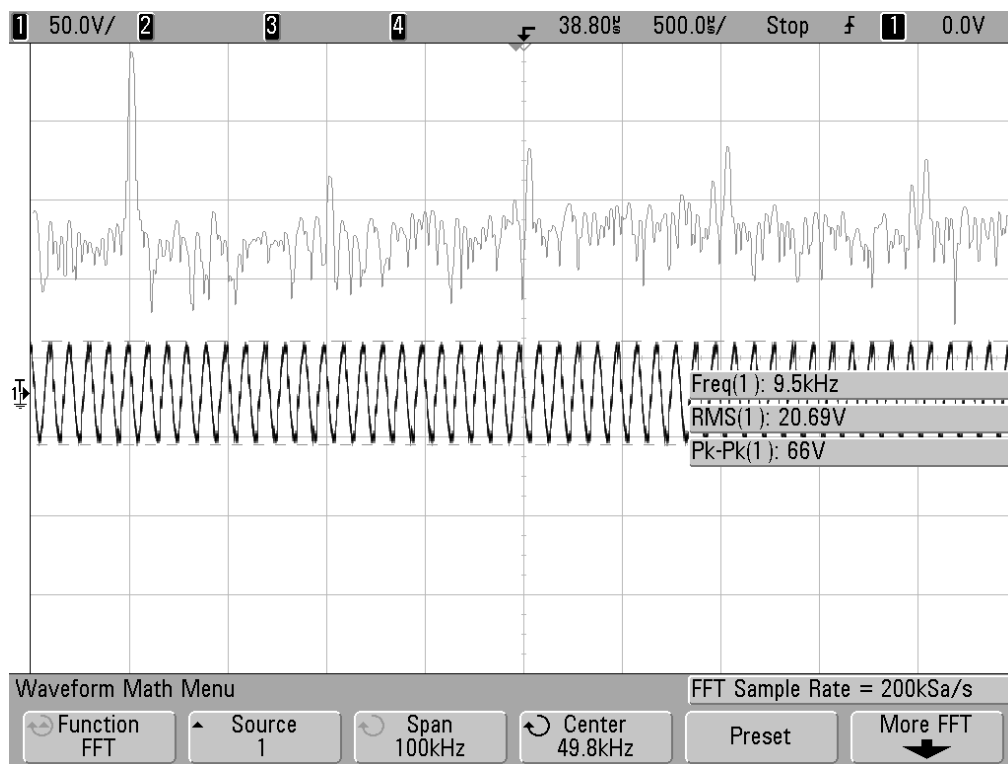
Maximální výstupní napětí je 15,7V na zátěži  $8\Omega$  což odpovídá 20W a 40W na zátěži  $4\Omega$ .

Napájeno laboratorním zdrojem  $\pm 25V$



*Obr. 42 přenos obdélníka TDA8950*

Na tomto vzorku bohužel není změřena rychlost přeběhu, ale je znát výrazný překmit a zvlnění způsobené spínáním. Vzhledem k charakteru koncového stupně je horní mezní frekvence omezena na 30kHz aby se omezilo rušení spínáním. Dokáže dodat výstupní výkon 100W do zátěže 4Ω.



*Obr. 43 frekvenční rozklad zkresleného signálu*

Na tomto průběhu je patrné zkreslení způsobené velkým počtem harmonických o malé amplitudě.



## ZÁVĚR

V této práci byla jako cíl stanovena realizace koncového zesilovače s elektronkami o dostatečném výstupním výkonu pro ozvučení běžné místnosti s využitím vícepásmových reprosoustav a dosažení nejlepších možných parametrů.

První část se věnuje historii, principu funkce a možnostem zapojení s elektronkami. Dále pak jsou popsány rozdíly mezi koncovými zesilovači sestavenými z elektronek, tranzistorů a integrovaných obvodů. Jejich výhody, nevýhody filozofie návrhu a segment použití.

Samotný zesilovač pak vychází z výběru popsaných zapojení. Konečný návrh je řešen jako dvojčinný koncový stupeň v B třídě s dvojicí pentod EL34. Ty jsou řízeny invertorem s katodovou vazbou a dvojitým vstupním dílem pro dosažení dostatečného zesílení. Celá konstrukce obsahuje pouze celkovou zpětnou vazbu bez lokálních, které omezují přenosové pásmo a tím i strmost. Napájení pro anody, předpětí mřížek a žhavení koncových i řídicích elektronek je řešeno čtyřmi samostatnými větvemi s transformátorem pro každý kanál zvlášť. Celkové rozmístění komponent je navrženo s důrazem na co nejmenší vzájemné rušení. Vzhledem k hmotnosti celkové konstrukce a zmíněnému rušení je šasi navrženo z ocelového plechu o tloušťce 1mm jako polozavřený profil se samostatně stíněnými transformátory.

V poslední kapitole je popsáno měření takto zhotovené konstrukce. Podařilo se realizovat zesilovač s výstupním výkonem  $2 \times 50\text{W}$  pro zátěž  $8\Omega$  a maximálním rozkmitem 62V při vstupní citlivosti 330mV. Odstup rušivých signálů dosahuje hodnoty 94dB. Přenos je od 6Hz do 130kHz pro -3dB a 8Hz až 72kHz pro -1dB při výstupním výkonu 12W. Což splní i požadavek pro reprodukci SACD (Super Audio Compact Disc) nebo Gramofonových desek. Kompletní dokumentace je součástí přílohy.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. **Lukeš, Jaroslav.** *Věrný zvuk.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.

2. **Vlach, Jaroslav.** *Lampárna.* Praha: BEN, 2004. 80-7300-091-1.

3. **Russell O. Hamm:** <http://www.butleraudio.com/tubesvstrans1.html>  
<http://www.butleraudio.com/tubesvstrans2.html>  
<http://www.butleraudio.com/tubesvstrans3.html>

4. **Hlava František** <http://hlava.webpark.cz/>

5. <http://www.elektronky.wz.cz/>  
<http://www.hornstudio.cz/>

6. **Federmann Bohumil** <http://www.federmann.cz/>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Znázornění konstrukce elektronky (triody)
- Obr. 2 Schématická značka elektronky (triody)
- Obr. 3 Základní zapojení triody
- Obr. 4 Modelová charakteristika elektronky (triody ECC82)
- Obr. 4a Náhradní schéma s řízeným zdrojem napětí
- Obr. 4b Náhradní schéma s řízeným zdrojem proudu
- Obr. 5 Blokové schéma zesilovače
- obr. 6 Zapojení vstupní elektronky
- Obr. 7 Elektronka jako katodový sledovač
- Obr. 8 Invertor s pomocnou elektronkou
- Obr. 9 invertor s automatickou symetrizací
- Obr. 10 Invertor s rozdělenou zátěží
- Obr. 11 Invertor s proudovou vazbou
- Obr. 12 Invertor s katodovou vazbou spojenými odpory
- Obr. 15 Invertor s křížovou vazbou
- Obr. 16 Invertor s křížovou vazbou a přidanou elektronkou
- Obr. 17 Základní zapojení jednočinného koncového stupně
- Obr. 18 Základní zapojení dvojčinného koncového stupně
- Obr. 19 Přenos pro třídu A
- Obr. 20 Přenos pro třídu B
- Obr. 21 Přenos pro třídu AB
- Obr. 22 Schéma výkonového zesilovače
- Obr. 23 náhled na simulační model
- Obr. 24 simulace žhavení pro budící elektronky

Obr. 24 simulace žhavení pro koncové elektronky

Obr. 25 simulace předpětí při odběru 10mA

Obr. 26 Simulace anodového napětí při zatížení 70mA a 300mA

Obr. 27 Schéma zdroje

Obr. 28 náhled na DPS výkonového zesilovače

Obr. 29 náhled na DPS napájecího zdroje

Obr. 30 Blokové schéma zapojení jednoho kanálu

Obr. 31 náhled na model spodní části

Obr. 32 náhled na model stínění transformátorů s přepážkami

Obr. 33 náhled na model sestaveného šasi

Obr. 34 Vstupní (Ch1) a výstupní (Ch2) signál

Obr. 35 Chování v limitaci (oba kanály)

Obr. 35 Frekvenční přenos pro vybrané výstupní výkony

Obr. 36 rychlost přeběhu

Obr. 37 Frekvenční rozklad zkresleného signálu.

Obr. 38 Velikost přeslechu v závislosti na frekvenci

Obr. 39 účinnost celé konstrukce

Obr. 40 rychlost přeběhu TDA2025

Obr. 41 frekvenční rozklad zkresleného signálu

Obr. 42 přenos obdélníka TDA8950

Obr. 43 frekvenční rozklad zkresleného signálu

## **SEZNAM PŘÍLOH**

1. Datasheet EL34 Philips
2. Datasheet ecc83-S JJ-electronic
3. Datasheet ecc82 JJ-electronic
4. Dokumentace k DPS
5. Dokumentace k šasi
6. Fotodokumentace